

地形特性と状態量の空間的分布を考慮した 流出系モデルのスケールアップ

市川 温・椎葉 充晴・高棹 琢馬

LUMPING A RUNOFF MODEL TAKING ACCOUNT OF SPATIAL DISTRIBUTIONS OF TOPOGRAPHIC CHARACTERISTICS AND STATE VARIABLES

By Yutaka ICHIKAWA, Michiharu SHIIBA, and Takuma TAKASAO

Synopsis

The topographic characteristics of a basin have great influence on runoff processes. If a lumped runoff model that takes into account the topographic characteristics of a basin can simulate runoff processes as exactly as and faster than a distributed runoff model, the former will be very useful. This paper describes a method to lump and scale up a distributed runoff model taking into account the topographic characteristics and shows the results of its application. In our method, we investigate distributed nature of topographic characteristics in a basin using the Basin Geomorphic Information System (BGIS), and lump slope systems using the cluster analysis technique. We also make a lumped stream network model on the assumption that stream discharge varies linearly along each stream segment at individual moment.

1. はじめに

わが国の従来の流出解析は、一河川流域規模を対象として行なわれることが多かった。国土が狭く急峻なために長大な河川がなく、また流出解析の主目的が治水計画の策定などの比較的ローカルな水工学的要求に應えることだったからである。

しかし、近年では、よりグローバルな枠組のなかで流出解析を行なう機会がふえてきている。たとえば、大陸河川の流出予測を行なったり、あるいは気象系との相互作用を考慮に入れて流出系を分析するような場合である。こうした流出解析では、対象とする流域の規模がかなり大きくなるため、その分析に用いる流出系モデルもスケールアップする必要がある。

一般に、大規模な流域の流出系モデルを構成する場合、集中型モデルが用いられることが多い。分布型モデルを用いると、流域全体系のモデルの構成が複雑になったり、計算に時間がかかりすぎるといった問題が生じ、実用的ではないからである。しかし、たとえば上述のように、気象系一流出系の相互作用を考えるとすると、流域内の状態量や地形の空間的分布に関する情報が必要となるかもしれない。とすれば、状態量や地形をマクロに取り扱う集中型モデルでは不十分である可能性がある。

このように両者それぞれに問題があり、それゆえ、どちらが正しく、どちらがまちがっている、ということではなく、両者を補完的に考えることによって、流出系モデルのスケールアップを議論していくべきである。

上述のような問題を解決する方法として、まず、**集中型モデルの分布化**ということが考えられる。これ

は、集中型モデルを空間的に多数配置し、それらのパラメタや入力値を空間的な分布に応じて変えることによって、状態量、地形量の空間的变化を考慮する方法である。実際に、こうした方法によって構成された流出系モデルの例は多い。

この方法は、たとえば流域の出口の流量だけを問題にするような場合には、非常に現実的な方法といえよう。空間的に配置された一つ一つのモデルの出力から、流域内部の状態量の分布もある程度知ることができる。しかし、一つ一つのモデルが表すサブ流域の内部については、用いるモデルにもよるが、やはり black box 的にならざるを得ない。気象系とのインタフェースをモデル化するような場合には、この方法では不利である。

とはいえ、対象とする流域が大きくなれば、当然その内部には異なる地形特性、植生、気象諸量等を有するサブ流域が複数存在するだろうから、それらを分けてモデル化したうえでそれらを組み合わせる、というこの方法のコンセプトは非常にわかりやすく、自然である。唯一問題といえるのは、サブ流域内部が black box になることである。ならば、サブ流域内部の地形特性や状態量の分布を考慮したうえで、各サブ流域内の流出過程を集中的にまとめて取り扱うことができればよいのではないだろうか。いわば、**分布型モデルの集中化**である。

以上の考察より、本研究では流出系モデルのスケールアップに対して、以下に示す方法で取り組むことにする (Fig. 1)。

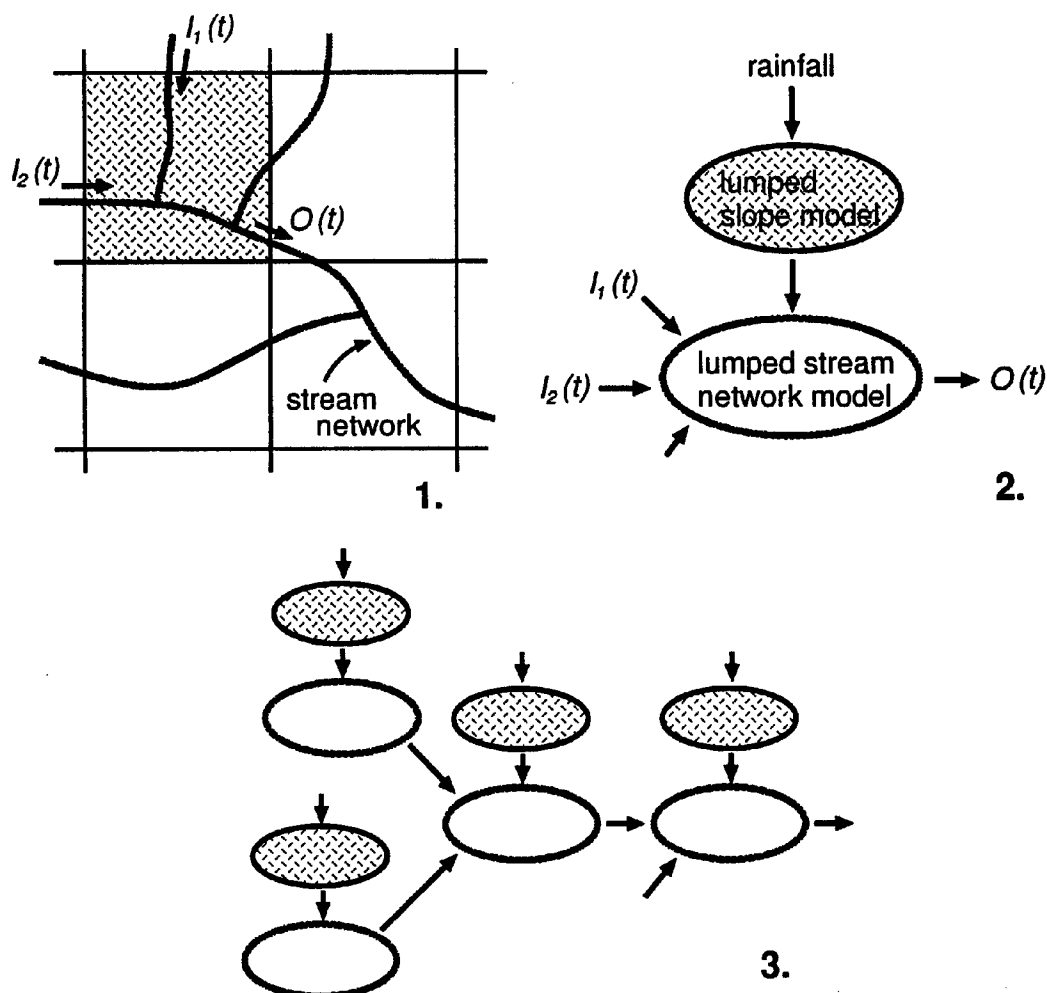


Fig. 1 Methodology to scale up a runoff model.

1. 対象流域を、流出特性や地形特性などがある程度一様とみなせるサブ流域に分割する。分割の形状は格子状とする。
2. サブ流域内部の地形構造、および地形特性や状態量の分布を考慮したうえで、河道網系・斜面系の流れのモデルを集中化する。
3. 集中化された流れのモデルを相互に接続することで流域全体系のモデルを構成する。

1. で、分割の形状を格子状とするのは二つの理由がある。一つは、2. でサブ流域内部の地形特性を把握するために、数値地図情報および地理情報システムを利用することを念頭においているからである。数値地図情報はグリッドデータで与えられることが多いので、サブ流域の形状もグリッド型にしておくとう都合である。もう一つは、気象系モデルとの結合を想定しているからである。気象系モデルの多くは、空間的に格子を設け、その格子点上の気象諸量を計算する。気象系との相互作用を考慮して流出系を分析することを考えると、流出系モデルの側でも格子をベースにしておけば、両モデルを結合しやすくなる。

本論文の構成は以下のようである。

第2章で、サブ流域内の流れのモデルの集中化について説明する。

第3章では、流れのモデルを相互接続するシステム OHyMoS (Object-oriented Hydrological Modeling System: 構造的モデル化システム) について説明する。

第4章では、第2章で構成したサブ流域内の流れのモデルを実流域に適用して、集中化手法の妥当性、集中化誤差の構造などについて検討する。今回は、集中化された流れのモデルそのものの動作を検証するために、対象流域として、面積が約 95 km² とさほど大きくない流域を選び、これを分割せずに一つのサブ流域とみなしてモデルを適用した。

第5章では本研究の結論と今後の課題について述べる。

2. 地理情報システムを利用した流れのモデルの集中化

2.1 概要

河川流域は、複雑に分布する山腹斜面と河道との集合体である。各河道区分では、上流端からその河道区分に流入する河道区分の流出量が流入し、これに側方流入量が加わって下流し、下流端の流出量となる。

こうした流出形態に最も忠実で基本的といえる計算方法は、河道流を上流側から河道網にしたがって逐一追跡していく方法である。しかしこの方法は、対象流域が大きくなると計算に大変時間がかかり、実用的とはいえない。

また、近年では、国土数値情報のような数値化された地理的情報の整備も進んでいる。こうした状況をダイレクトに活用するモデルとして Fig. 2 のようなモデルが挙げられる。これは分布型モデルの一種で、流域全体を細かなグリッドで覆い、格子点から格子点に雨水が流れるとして雨水の流れを追跡していくものである。

しかしながら、このようなモデルは、結局は山腹斜面も含めて流域全体を河道として扱うことになるし、また、流れの方向も4方向あるいは8方向というように限定されてしまうので、現実の流出形態に即しているとはいえない。

流域地形の構造・特性が、流出形態・流出特性に影響を与えているのは明らかだから、まず、流域場の地形構

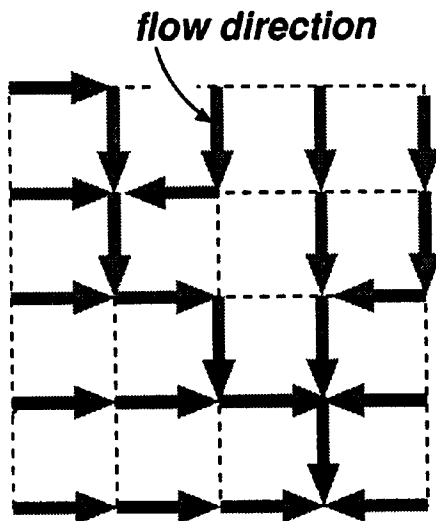


Fig. 2 Grid model.

造・地形特性を把握し、それを土台として流域内の雨水の流動を扱うというのは、非常に自然な考え方である。

このような考え方にもとづいて、立川ら¹⁾は、流域地形情報システム BGIS (Basin Geomorphic Information System) を開発した。BGIS は、国土数値情報のようなグリッド型の地形情報データセットを加工することによって、流域内の地形構造を計算機上に再現するソフトウェアシステムである。このような機能を有するシステムはほかにも多数存在するが、しかし、BGIS はただ単純に地形構造を再現するのではなく、再現された流域場の上で実際の地形構造にできるだけ忠実に流出解析を行なうことを念頭において地形モデルを作成するため、流出現象に影響を与える地形量 (たとえば、斜面長、斜面勾配、河道長など) を容易に抽出できる、という特長を有している。本研究の趣旨は、『地形特性と状態量の空間的分布を考慮して、流れのモデルを集中化する』ということだったので、このような BGIS の特長は好都合である。

本研究ではまず、BGIS を用いて対象とする流域の地形モデルを作成する。ソースデータは国土数値情報の標高データ・流路位置データを利用する。ついで、その地形モデルから、流出現象に寄与する各種の地形量を計測し、その分布状況を考慮した上で流れのモデルを集中化する。

以下、2.2 では、BGIS および BGIS によって作成される地形モデルについて、2.3~2.5 では、3つの集中化された流れのモデルについてそれぞれ説明する。

2.2 流域地形情報システム BGIS

BGIS は、グリッド型の地形情報データセットから TIN-DEM (Triangulated Irregular Network Digital Elevation Model) データセットを作成して流域場をモデル化する地理情報システムである。TIN-DEM とは数値地形モデルの一種で、地表面を三角形要素網で覆い、その頂点の標高によって地形を表現するモデルである。三角形の覆い方は任意なので、非常に複雑な地形形状を有する部分では、三角形網の密度を高くするなど、流域地形に即して地形を表現できる利点を持っている。また、各三角形要素上の雨水の流れは kinematic wave モデルで近似できるとすれば、流水方向 (最急勾配方向) も容易に得ることができる。しかし、ただ単に三角形網で流域を覆えばよいというわけではなく、三角形要素間で雨水が受容される過程を取り扱えるようにしなければならない。そのためには、三角形要素の最急勾配方向をもとに、各三角形要素で雨水の流出する辺が一つとなるように三角形要素を構成すると都合がよい。このようにすれば、河道区分を含む三角形要素から始めて、上流に位置する三角形要素をつぎつぎとたどっていくことによって、その河道区分への斜面流出に寄与する斜面要素を特定することができ (Fig. 3)、その斜面要素の形状を計測することができる。

また、流域を三角形網で表現する過程で、流域内に河道網とつながっていない谷が現れることがある (Fig. 3)。この谷に流入する雨水がどこに流下するかを確定するために、この谷の下端から河道網に到達するまで最急勾配方向に下る。この谷及び河道網に到達するまでの経路をあらたに河道と認識し、もとの河道網と区別して準河道とよぶことにする。

以上より、BGIS で作成される地形モデルは、

- 斜面要素
- 準河道要素
- 河道網要素

の三流域要素から構成されることになる。本研究では、これら三要素それぞれについて、集中化された流れのモデル

- 集中型斜面モデル
- 集中型準河道モデル
- 集中型河道網モデル

を構成する。

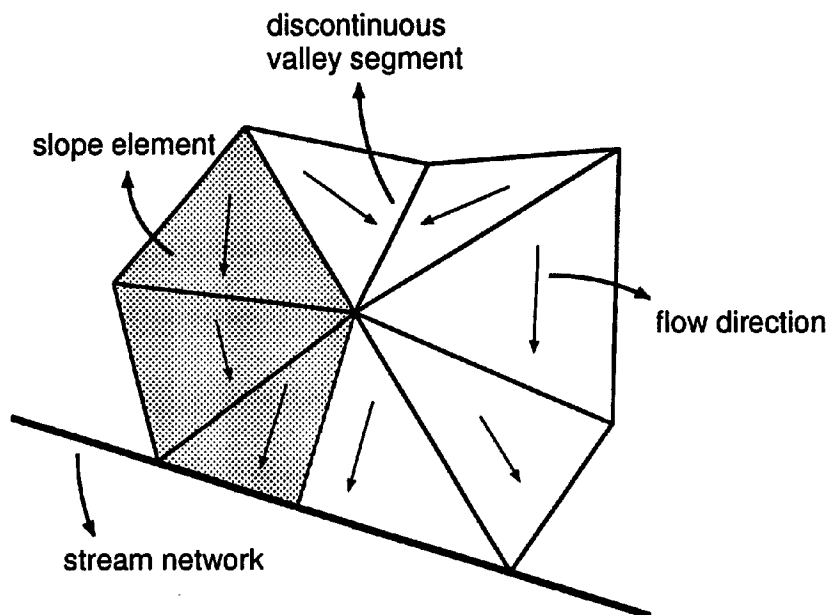


Fig. 3 Schematic representation of a slope element and a discontinuous valley segment to a stream network.

また、BGIS は流域地形をモデル化するだけではなく、その流出場の地形モデルを土台として、流域地形に即した分布型流出シミュレーションを行なうことができる。つまり、上流側の斜面、河道区分から下流側に向かって、流れの追跡計算を逐一行なうことができる。斜面要素については、中間流・地表面流統合型 kinematic wave モデル²⁾で流れを計算する。その結果を横流入条件として、準河道要素・河道網要素内の流れを指数法則 kinematic wave モデル $Q = \alpha A^m$ あるいは $A = KQ^P$ (Q : 流量, A : 通水断面積, α, m, K, P : kinematic 定数; $\alpha = (1/K)^{1/P}$, $m = 1/P$) で計算する。

第4章で、BGIS による流出計算結果と、本論文で展開する手法による流出計算結果とを比較することによって、集中化の合理性を検証する。

2.3 集中型斜面モデル

本研究では斜面要素を矩形で近似する。

本来、斜面要素は勾配や幅が複雑に変動しており、そのことが斜面からの流出形態におよぼす影響は無視できないものと思われる。たとえば、立川³⁾は、斜面形状を矩形で近似した場合と、勾配・幅の変動を表現できる三次スプライン補間関数を用いて近似した場合の流出計算結果の違いについて検討しており、流出形態を正しく再現するためには斜面形状を実地形に忠実に表現することが重要であると結論している。

筆者の見解も立川³⁾と同様である。地形特性の分布を考慮して流れのモデルを集中化する、というのが本研究の目的なのだから、斜面形状を精密に記述するのが理想であるのはいうまでもない。しかし、斜面要素を矩形とすることで地形特性の分布をより容易に把握できるということもまた無視できない事実である。矩形近似で充分であるとはいえないが、しかし第一近似としては満足できるのではないだろうか。

前に述べたように、BGIS で地形をモデル化すると、任意の河道区分への流出寄与域を知ることができる。その流出域を矩形で近似するために、斜面幅を『河道に接している三角形要素の辺を水平面に投影した長さ』、斜面長を『流出寄与域の面積を斜面幅で除した値』、斜面勾配を『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。

斜面要素を矩形で近似した場合、斜面系での流出過程に対して支配的な地形特性として考えられるのは、斜面長と斜面勾配である。これら二つの変量の分布を考慮して斜面系を集中化することを考える。

斜面長と斜面勾配とが互いに独立であるかどうかはわからないので、それぞれの分布を別個に調べるのではなく、多変量解析手法のひとつであるクラスター分析法を用いることにする。つまり、斜面長と斜面勾配をパラメタとして斜面要素群をいくつかのクラスターに分類する。

斜面要素 i と j との非類似度 d_{ij} は標準化ユークリッド平方距離

$$d_{ij} = (l_i - l_j)^2/s_l^2 + (g_i - g_j)^2/s_g^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

により定義する。ただし、 l_* , g_* はそれぞれ要素 $*$ の斜面長、斜面勾配を表し、 s_l , s_g はそれぞれ斜面長、斜面勾配の分散を表す。

また、クラスター間の非類似度は最短距離法 (nearest neighbor method) によって定義する。クラスター p とクラスター q を結合して、新しくクラスター t をつくるとする。 t と、別の任意のクラスター r との間の非類似度 d_{tr} は、最短距離法によると、 pr 間、 qr 間の非類似度 d_{pr} , d_{qr} を用いて次のように表される。

$$d_{tr} = \min (d_{pr}, d_{qr}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

各クラスターに含まれる斜面要素の長さ・勾配を面積で重みをつけて平均し、そのような長さ・勾配を持つ斜面要素を各クラスターの代表要素とする。各代表要素に対して中間流・地表面流統合型 kinematic wave モデルを適用し、流出高を求める。その結果を、各クラスターに含まれる斜面要素が占める流域面積で重み付けして加算し、全流出量を求める。斜面モデルからの出力 $q_A(t)$ は、全流出量を準河道・河道網の総延長で除したものである。

2.4 集中型準河道モデル

準河道は当然ながら樹枝状構造を有しているが、流出計算を簡略化するため、ここではその構造を無視し、単一河道に置き換えることにする。つまり、各準河道網の地形特性は本川の長さ・勾配で代表されるとし、そのような河道長・勾配を持つ単一河道で各準河道網を置き換える。

本モデルでも斜面モデルと同様、クラスター分析を用いる。すなわち、各準河道網の本川長さならびに勾配をパラメタとしてクラスター分析を行なう。各クラスターにおいて本川長さ・勾配の平均値を求め、そのような河道長・勾配を持つ単一河道を各クラスターの代表要素とする。側方流入条件として斜面モデルからの出力 $q_A(t)$ をあたえて、各代表要素からの流出高を kinematic wave モデルで計算する。準河道モデルからの出力 $q_B(t)$ はつぎのようにして計算される。

$$q_B(t) = \frac{1}{L_B} \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{\bar{Q}_i(t)}{\bar{L}_i} L_j^i \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 L_B は準河道要素の総延長、 N_C はクラスターの数、 N_i は第 i クラスターに含まれる準河道要素の数、 $\bar{Q}_i(t)$ は第 i クラスターの代表要素からの流出量、 $\bar{L}_i$ は第 i クラスターの代表要素の河道長、 L_j^i は第 i クラスターの第 j 要素の河道長である。

2.5 集中型河道網モデル

本モデル⁴⁾では、いくつかの河道区分をまとめて取り扱うために、河道網内の流量は河道に沿う距離とともに直線的に変化する、という仮定を導入する。この流量の変化率を $q_0(t)$ とすると、 $q_0(t)$ は (4) 式で与えられる。ただし、対象とする河道網へは M 個の流入河道があり、流入量を $I_i(t)$ と表すことにする。また河道網は N 個の河道区分から構成されており、 L_i は河道区分の長さを表すものとする。 $O(t)$ は河道網からの流出量とする (Fig. 4)。

$$q_0(t) = \frac{O(t) - \sum_{i=1}^M I_i(t)}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad \dots\dots\dots (4)$$

すると、河道区分 i の上流から距離 x 離れた地点の流量 $Q_i(x, t)$ は、

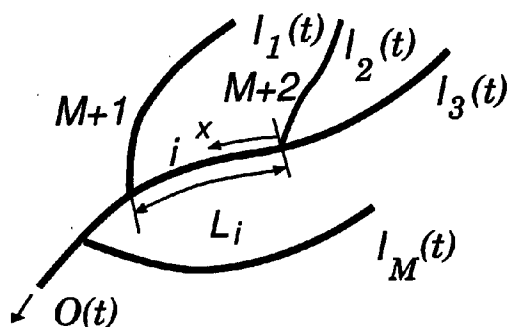
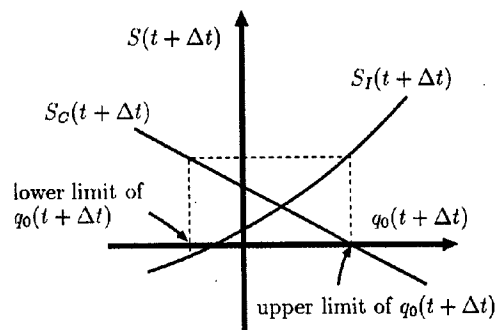


Fig. 4 Schematic representation of a stream network.

Fig. 5 The relationship between $S(t + \Delta t)$ and $q_0(t + \Delta t)$.

$$Q_i(x, t) = Q_i(0, t) + q_0(t)x \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

ここで、通水断面積 $A_i(x, t)$ と流量 $Q_i(x, t)$ との間には $A_i(x, t) = K_i Q_i(x, t)^{P_i}$ なる関係 (K_i, P_i : kinematic 定数) があるとする、通水断面積 $A_i(x, t)$ は $q_0(t)$ を用いて次のように表される。

$$A_i(x, t) = K_i \{Q_i(0, t) + q_0(t)x\}^{P_i} \quad \dots\dots\dots (6)$$

これを河道網に沿って積分すると、河道網内の貯留量 $S_I(t)$ が求まる ((7) 式)。

$$\begin{aligned} S_I(t) &= \sum_{i=M+1}^{M+N} \int_0^{L_i} A_i(x, t) dx \\ &= \sum_{i=M+1}^{M+N} \int_0^{L_i} K_i \{Q_i(0, t) + q_0(t)x\}^{P_i} dx \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

よって、時刻 $t + \Delta t$ における貯留量 $S_I(t + \Delta t)$ は $q_0(t + \Delta t)$ の関数となる。

一方、河道網内の貯留量に関する連続式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} dS(t)/dt &= \sum_{i=1}^M I_i(t) + Q_L(t) - O(t) \\ &= Q_L(t) - q_0(t) \sum_{i=M+1}^{M+N} L_i \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$Q_L(t)$ は河道網への横流入量である。

台形公式を用いて (8) 式を差分展開すると、時刻 $t + \Delta t$ での貯留量 $S_C(t + \Delta t)$ は次のように求まる。

$$\begin{aligned} S_C(t + \Delta t) &= S(t) + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \sum_{i=1}^M I_i(t) + Q_L(t + \Delta t) \right. \\ &\quad \left. + Q_L(t) - O(t) - q_0(t + \Delta t) \sum_{i=M+1}^{M+N} L_i \right\} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$S_C(t + \Delta t)$ も $S_I(t + \Delta t)$ と同様、 $q_0(t + \Delta t)$ の関数となっているので、両者を等しくする $q_0(t + \Delta t)$ を二分法で求め (Fig. 5), その値を用いて流出量 $O(t + \Delta t)$ を計算する。

3. 構造的モデル化システム OHyMoS を用いた流れのモデルの相互接続

構造的モデル化システム OHyMoS⁵⁾ とは、オブジェクト指向分析を利用して作られた、水文系のモデリング作業を支援するシステムである。このシステムでは、パラメタの設定、初期値の読み込み、データの授受、計算時間間隔の設定など、水文シミュレーションを行なう上で基本的でかつ共通な機能を抽象的な基本型モデルの関数として用意している。ユーザーが自分自身の要素モデルを作成するときは、この基本型モデル

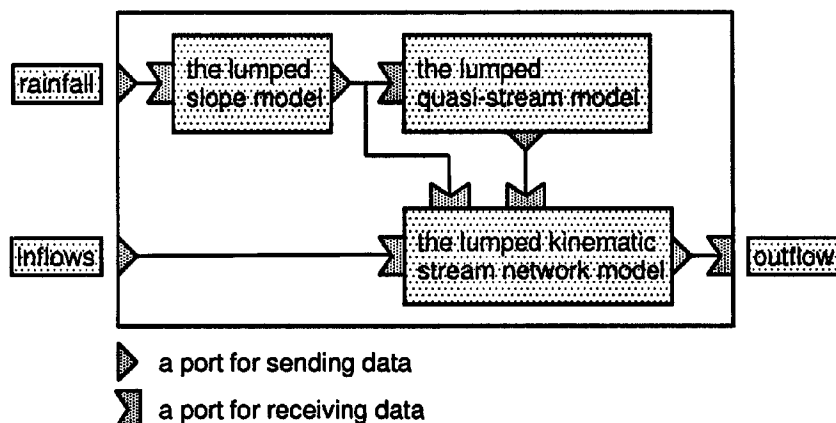


Fig. 6 Schematic representation of the structure of a sub-basin model in OHyMoS.

ルから派生させれば、共通部分についてはユーザーはプログラミングする必要がなくなり、個々のモデルに特有な部分のみを記述すればよいということになる。

ある要素モデルの出力データを他の要素モデルが入力データとして利用するという関係は、端子によるデータ授受の関係としてモデル化されている。要素モデル間でやりとりされるデータは、その記録時刻と対になってさえいれば、その形式をユーザーが任意に定義することができる。

本研究では、2.3~2.5で述べた3つの集中化された流れのモデルをOHyMoSの要素モデルとして実現した。これら三つの要素モデルを接続して構成したサブ流域のモデルの模式図をFig. 6に示す。流域全体系のモデルは、このサブ流域のモデルをさらに相互に複数接続することで構成される。

本研究で作成した三つの要素モデルは、それぞれ端子によって接続されている。端子によるデータ授受方法は非常に簡潔で利便性が高いが、情報のながれが一方方向なので、全体系の構成によっては対応できないこともある。例えば、二つの要素モデルが互いに影響しあいながら計算を進めていくような場合である。このようなことも考慮して、要素モデル同士が端子を通さず、直接通信してデータを授受することもできるようになっている。本研究では直接通信機能は利用していない。

4. 適用と考察

4.1 服部川流域における出水の再現

以上述べてきた手法を、淀川上流の支川である服部川流域（流域面積：約95 km²）を適用し、集中化の合理性について検討する。はじめに、対象流域の地形を空間分解能が250 mの国土数値情報をもとにBGISでモデル化したところ、準河道を含む河道網の最大位数は5、総河道区分数は719、準河道の数は123となった。また、総斜面要素数は1963となった。Fig. 7に斜面要素の散布図を示す。横軸は斜面長（m）で、

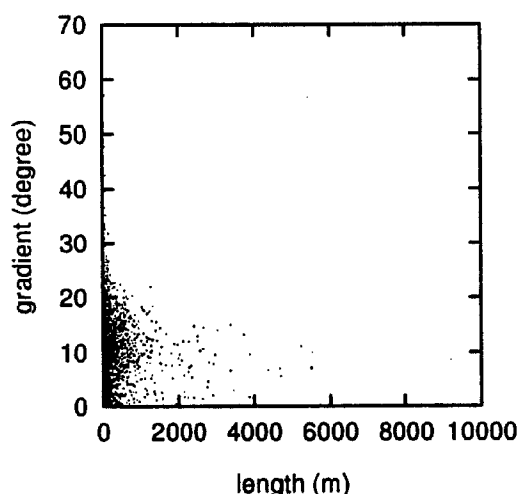


Fig. 7 The distribution of lengths and gradients of slopes in the Hattori River Basin.

縦軸は斜面勾配 (°) である。

本研究では、流域内の雨水の流動を3つの集中化された流れのモデルで表現する。したがって、流域下流端の河川流量は、3段階の変換過程を経ることになる。これらのモデルの集中化誤差を分離するため、対象流域の斜面系と河道網系の変換効果の特性を、BGISの流出計算機能を使って調査する。

BGISの流出計算では、どの斜面要素がどこにあるのか、ということを考えている。つまり、斜面からの流出は空間的に分布していることになる。もし河道網系での滞留時間が長く、河道網系の効果が大きければ、斜面流出の空間的な分布は流域下流端での流出に大きく影響するだろう。逆に河道網系の効果が小さければ、斜面流出が遅れ時間なしで流域下流端に到達するようなものだから、斜面流出の分布はあまり効かないことになる。ということは、斜面群の流出をすべて重ね合わせたものを平均的な斜面流出として、これを空間的に一様に与えたとしても、流域下流端では、斜面流出を分布させた場合と同様の結果が得られるはずである。

Fig. 8はBGISで斜面流出の分布を考慮した場合としない場合の計算結果の比較である。パラメタは流域全体でA層厚0.8 m、透水係数0.015 m/sec、間隙率0.23、粗度係数は斜面では0.3 sec/m^{1/3}、河道では0.05 sec/m^{1/3}とした。両計算結果が非常に似通っており、また、雨のピークから平均的な斜面流出のピークまでが約2時間であるのに対し、平均的な斜面流出のピークから下流端での流出のピークまでが約30分となっていることから、この程度の大きさ(95 km²)の流域で、かつ0.05 sec/m^{1/3}という河道の粗度係数では、河道網系での滞留時間はさほど長くない、変換効果も小さく、むしろ斜面系の変換効果の方が支配的であることがうかがえる。したがって、この流域では河道網系、すなわち準河道、河道網の集中化誤差はあまり問題ではなく、斜面系の地形特性の分布をいかによく近似するかが重要といえる。

以下の議論では、河道網系のモデルは十分な精度で集中化されていると仮定して、斜面系の集中化誤差についてのみ検討する。ちなみに準河道は12個のクラスターに分類した。

斜面要素群を、分類数を20, 100, 200, 400と変えてクラスター分析し、それぞれに対して集中化した斜面流出を求めた。これらの集中化した斜面流出と平均的な斜面流出をあわせてFig. 9に示す。また、これらの斜面流出を使って求めた流域下流端の流量ハイドログラフをFig. 10に示す。

Fig. 9, 10で興味深いのは、斜面要素クラスターを増やすにしたがって、ハイドログラフの低減部の形状が大きく改善されていくということである。この流域のように河道網系の効果の小さい流域では、低減部は様々なパターンの斜面流出の重なりで表現されるということが、これらの図から読みとれる。

4.2 クラスター分析と地形特性分布との関係に関する考察

斜面要素クラスターを増やすことによって、斜面系地形特性の分布はよりよく再現される、ということは容易に想像できる。では、クラスターの数を変えることによって、地形特性の分布は具体的にどのように変化しているのだろうか。また、クラスターを増やすだけでなく、クラスター分析の手法を変えることによって、より効果的に地形特性分布を近似できないだろうか。

Fig. 11は、各クラスター分類数に対する斜面長のヒストグラムである。縦軸はその長さの斜面要素が全流域面積に対して占める割合である。横軸(斜面長)の範囲は0~5000 mとした。実際には斜面長が5000 m以上の要素も存在するのだが、ヒストグラムを見やすくするためにここでは載せなかった。斜面長が5000 m以上の要素が全流域に対して占める面積の割合は約2%である。階級の幅は50 mとした。

またFig. 12には、斜面長と同様に作成した、各クラスター分類数に対する斜面勾配のヒストグラムを示す。こちらは全要素を載せている。階級の幅は0.01 rad (約0.57°)とした。

斜面長・斜面勾配ともに一目見て気がつくのは、クラスター数が20~400のヒストグラムでは、ひとつだけ非常に突出した階級が存在していることである。クラスター数1963、すなわち地形モデルから抽出したままの生のデータでは、そのような階級は存在していない。クラスター数を増やすにしたがって、徐々にではあるが、それ以外の階級が占める面積率がふえており、生データが示す地形特性の分布状況に近付いてい

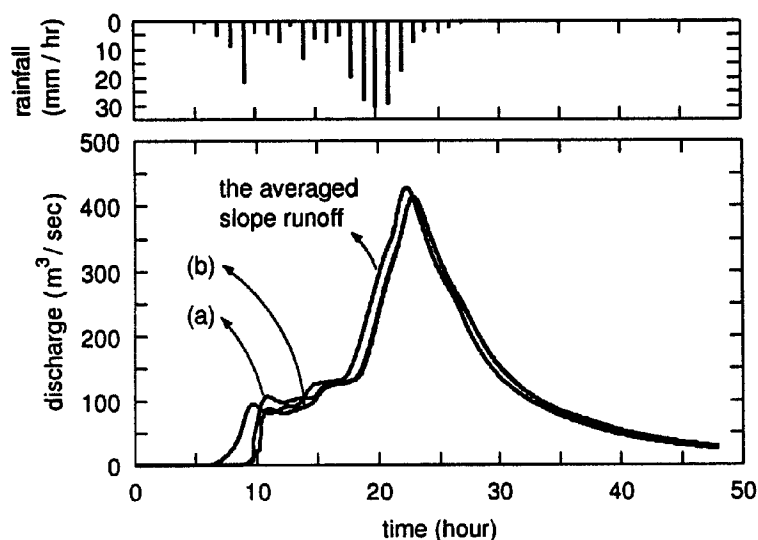


Fig. 8 The averaged slope runoff and the results of the BGIS runoff simulation using two types of slope runoffs: (a) spatially distributed slope runoffs; (b) the averaged slope runoff.

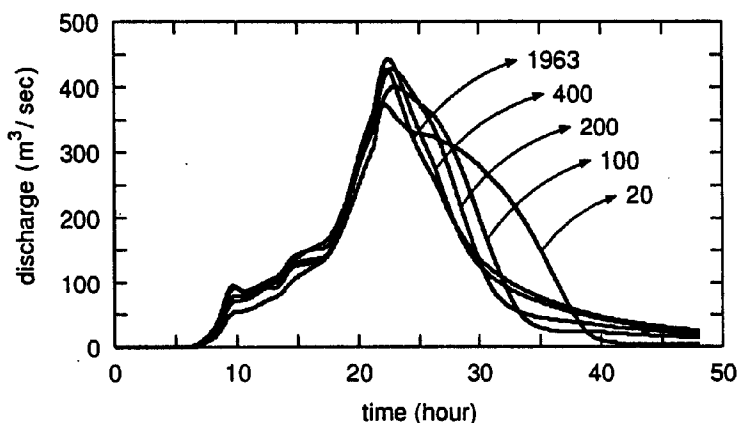


Fig. 9 Four lumped slope runoff hydrographs and the averaged slope runoff hydrograph. The hydrograph with 1963 is the averaged slope runoff hydrograph. The numbers 400, 200, 100, and 20 show the numbers of the clusters.

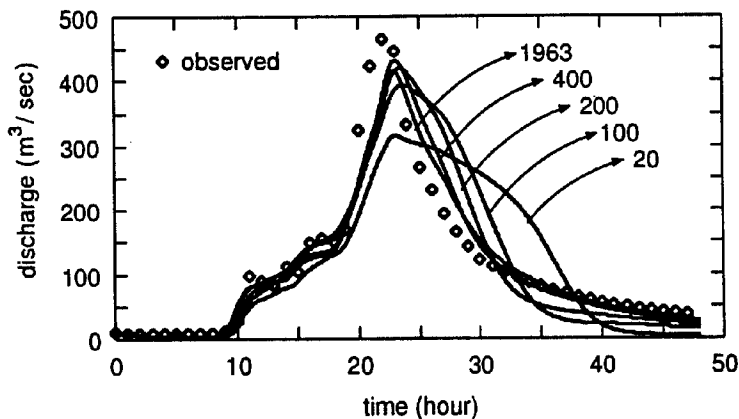


Fig. 10 The outlet discharge hydrographs obtained by using lumped slope runoffs shown in Fig. 8 as inputs to the lumped quasi-stream network model and the lumped stream network model.

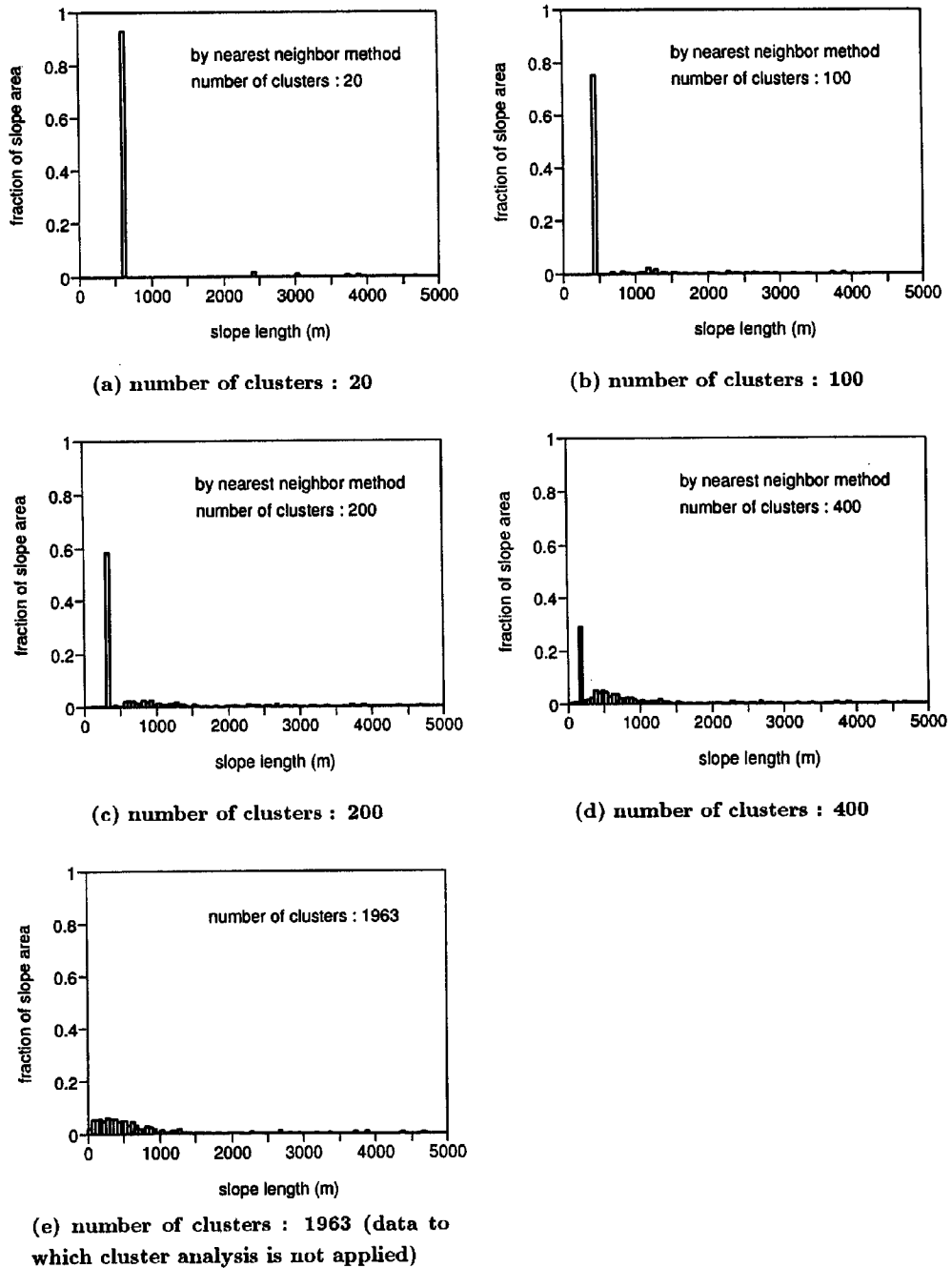


Fig. 11 Histograms of slope length. Nearest neighbor method is used for cluster analysis.

くのがわかる。とはいえ、クラスター数が400のヒストグラムでも、生データのそれとはかなりかけはなれており、そのことが流出計算の精度に影響したと考えられる。

なぜ、このようにひとつだけ突出した階級が出現したのだろうか。その理由として、集中型斜面モデルで用いたクラスター分析の手法である最短距離法が考えられる。最短距離法には、鎖効果 (chain effect) とよばれる現象がおきるといった特徴がある。鎖効果とは、たとえば要素が Fig. 13 のように分布しているとき、点6、7が比較的近い位置に存在している点11、12などとは結びつかず、かえって遠い点1、2などと

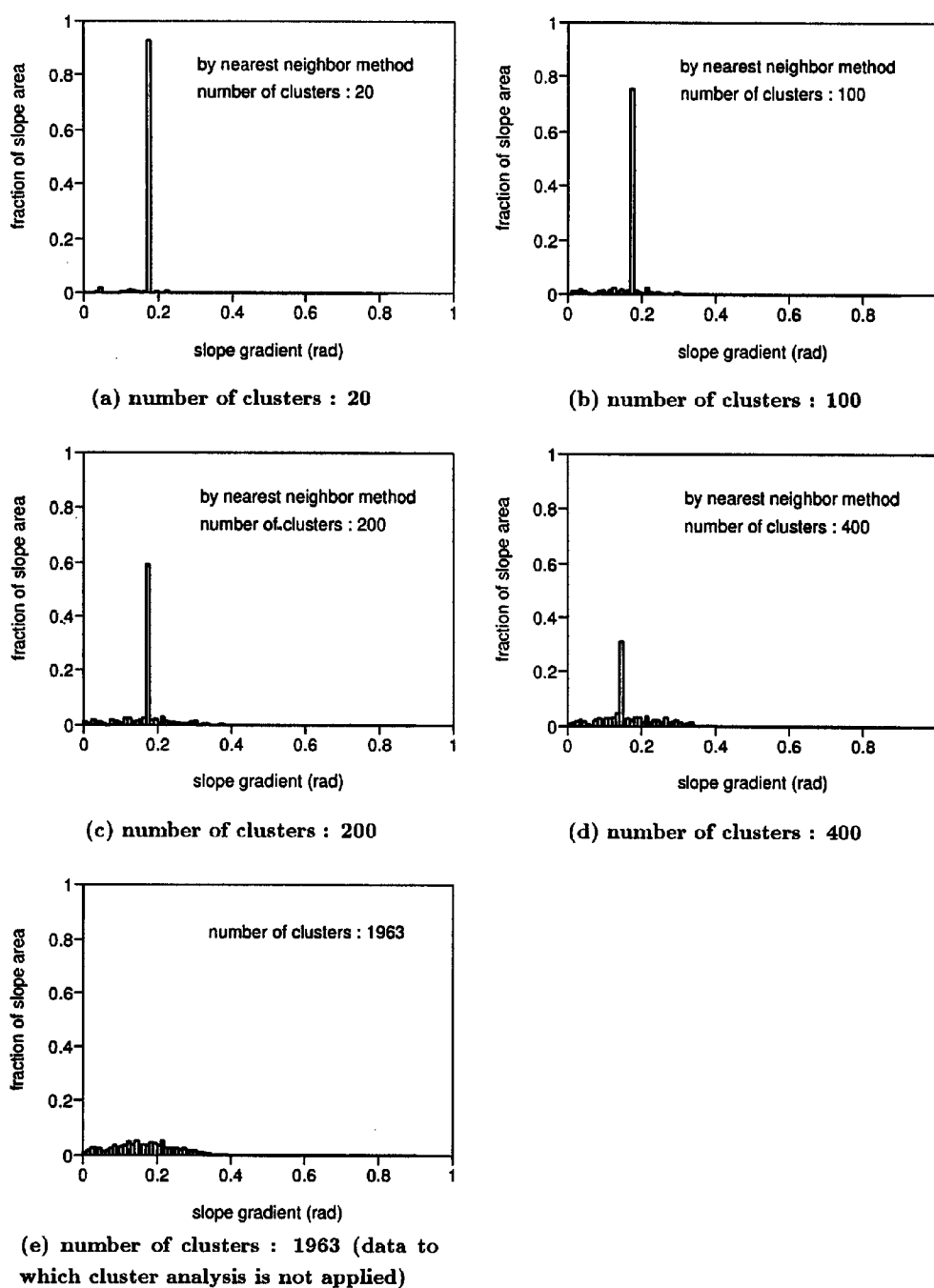


Fig. 12 Histograms of slope gradient. Nearest neighbor method is used for cluster analysis.

結び付いてしまうという現象である。

もう一度、斜面要素の散布図 **Fig. 7** を見てみよう。斜面長ではおおよそ 500 m を中心として 0~1000 m の範囲に、斜面勾配では 10° (約 0.17 rad) を中心として 0~ 20° の範囲にかなり多くの要素が分布しており、これらが鎖効果によって芋蔓式に連なることで、ひとつの大きなクラスターを形成していると考えられる。

より効率的に地形特性の分布状況を近似するには、最短距離法はやや不適當であることがわかったので、最短距離法に代わる手法として群平均法 (group average method) によるクラスター分析を試みることにする。群平均法は、クラスター間の非類似度を、それらに含まれる対象間の非類似度の平均的な値で定義する方法で、鎖効果のような現象は生じない。(2) 式と同様の形式でクラスター間の非類似度を定義すると、

$$d_{ir} = (A_p d_{pr} + A_q d_{qr}) / (A_p + A_q), A_t = A_p + A_q \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ただし、 A_* はクラスター*に含まれる斜面要素が占める流域面積の総計である。

Fig. 14 に群平均法による斜面長のヒストグラムを示す。また Fig. 15 には、群平均法による斜面勾配のヒストグラムを示す。斜面長・斜面勾配ともに、最短距離法によるヒストグラムにあった、ひとつだけ突出した階級は見当たらなくなっており、定性的ではあるが、最短距離法よりは地形特性の分布をよりよく近似しているといえる。

Fig. 16 は、クラスター分析に群平均法を用いた集中型斜面モデルの計算結果である。Fig. 9 と比較すると、同じクラスター数でも群平均法を用いた方が計算精度が良く、より効率的に集中化できていることがわかる。

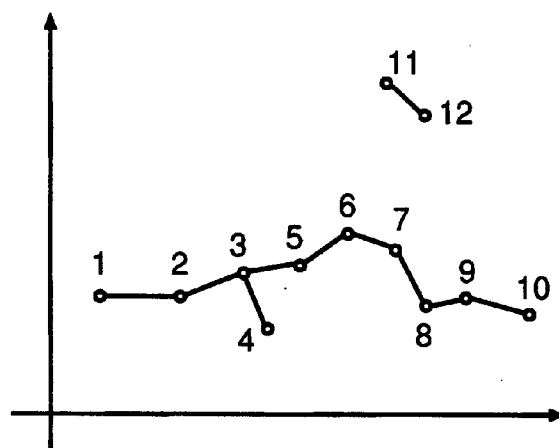


Fig. 13 Chain effect.

5. 結論と今後の課題

本研究の成果をまとめると以下のようなものである。

本研究ではまず、地理情報システムの一つである BGIS を利用して、対象流域の地形モデルを作成した。ついで、その地形モデルから斜面長・斜面勾配・準河道の本川長などの地形量を計測した。そして、斜面要素・準河道要素については、その地形量の分布状況を考慮し、クラスター分析を利用して流れのモデルを集中化した。河道網については、河道網内の流量は河道に沿って直線的に変化するという仮定を設けて、流れのモデルを集中化した。これらのモデルを、構造的モデル化システム OHyMoS を用いて接続し、対象流域のモデルを構成した。

集中化された流れのモデルを実際の流域に適用するにあたって、まず、BGIS の流出計算機能を使って対象流域の流出変換特性を調査した。その結果、今回対象とした服部川流域では、河道での滞留時間はさほど長くなく、変換効果も小さく、むしろ斜面系の変換効果の方が支配的であることがわかった。そこで、準河道、河道網の集中化の程度は固定しておき、斜面系の集中化誤差に焦点をしばって検討した。

はじめに、クラスター分析手法として最短距離法を採用し、クラスター分類数を 20, 100, 200, 400 と変えて斜面系の流出計算を行なった。すると、クラスター数を増やすにしたがってハイドログラフの形状が改善された。これは斜面要素クラスター数を増やすことによって、斜面系地形特性の分布がよりよく再現されたためと考え、地形量のヒストグラムをとることで、クラスター数の変化を伴う地形特性分布の変化の様子を調べた。その結果、確かにクラスター数を増やすにしたがって地形特性の分布はよりよく再現されていたが、最短距離法の特徴である鎖効果によって一つだけ突出した階級が現れており、より効率的に地形特性の分布状況を近似するには、最短距離法はやや不適當であることがわかった。そこで、最短距離法に代わる手法として群平均法を採用したところ、一つだけ突出した階級は現れなくなり、同じクラスター数でも流出計算精度が向上した。

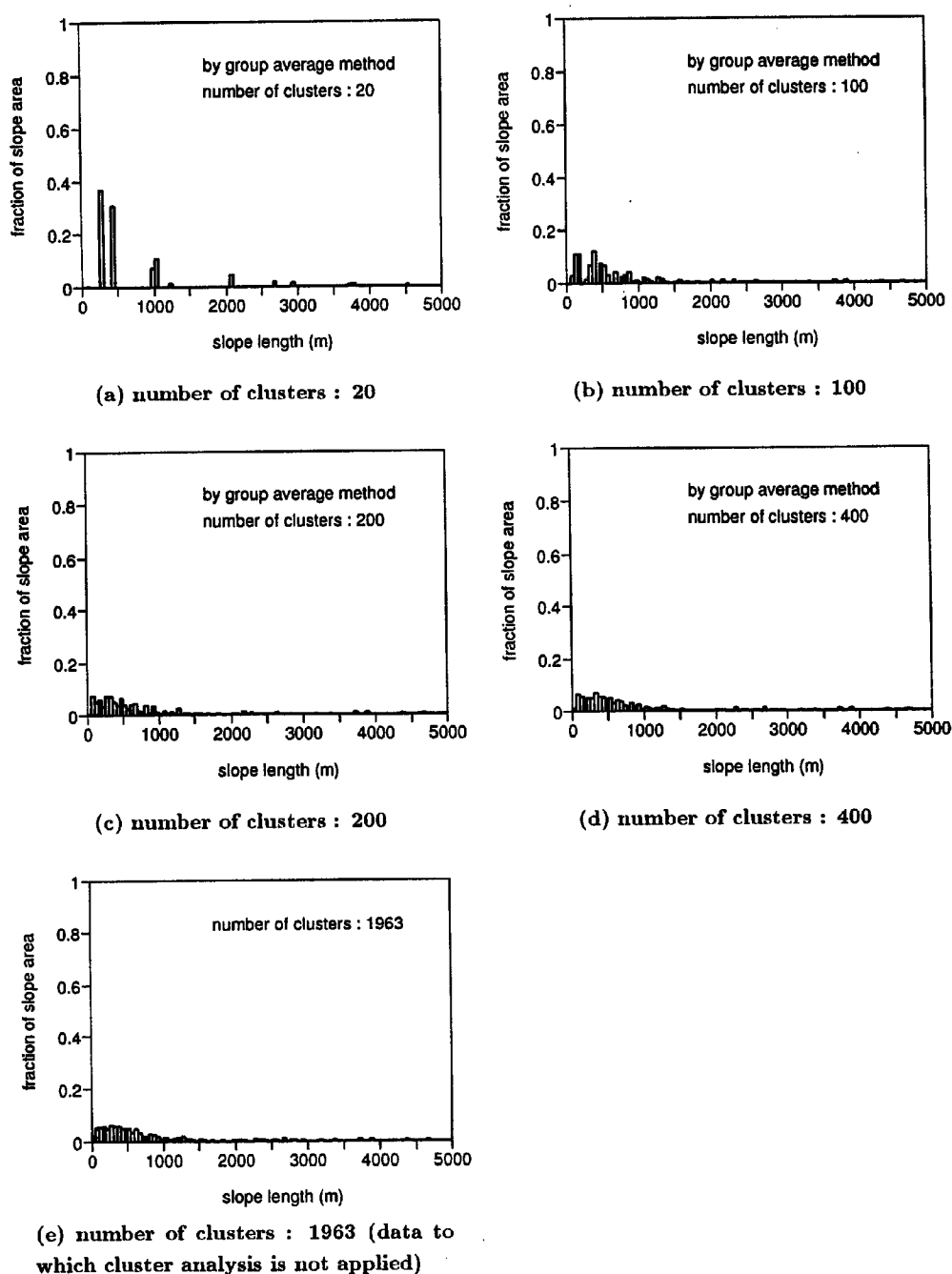


Fig. 14 Histograms of slope length. Group average method is used for cluster analysis.

今後の課題としては、まず、クラスターの分類数を決める基準について検討することがあげられる。今回のように、集中化されたモデルの出力であるハイドログラフの形状から分類数を決めるのも一つの方法であるが、地形特性のデータそのものに統計的な指標を導入して、クラスター分析の前後でその指標があまり変化しなくなれば、地形特性の分布が充分表現されているとして分類数を決定する、という方法も考えられる。

今回議論できなかった準河道、河道網の集中化誤差についても、河道の効果が大きい流域にモデルを適用

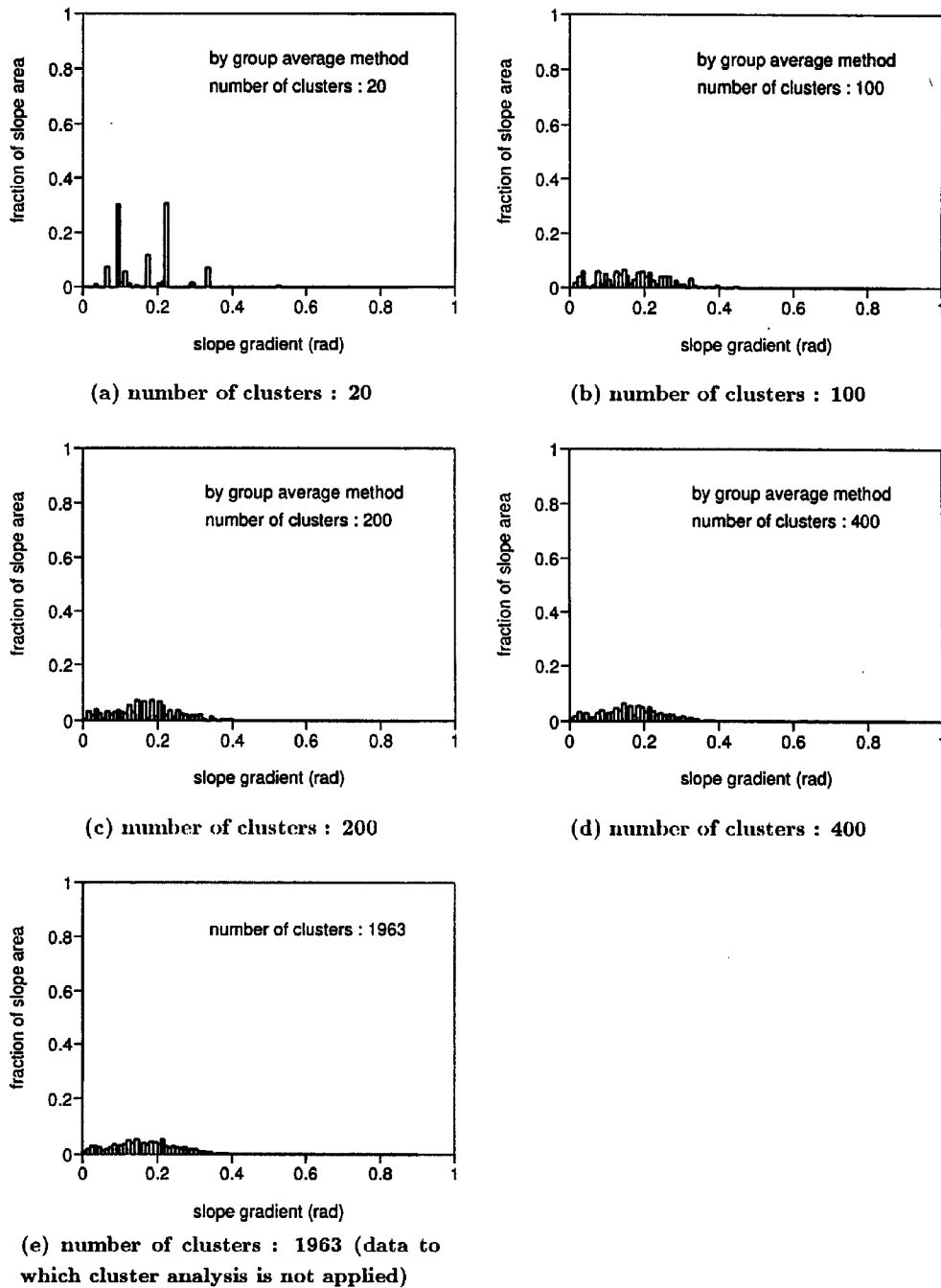


Fig. 15 Histograms of slope gradient. Group average method is used for cluster analysis.

することで、その構造を明らかにしなければならない。特に、樹枝状構造を無視して単一の河道におきかえるという準河道の取り扱い方が適当であるか否かについては十分な検討を要する。また、河道の効果が大きい流域では、今回のように斜面流出を空間的に一様として取り扱うことはできない。斜面の位置を考慮したうえで斜面流出を取りまとめる手法についても検討が必要である。

さらに、斜面要素を矩形近似することも簡便法の域を出ていない。実地形により忠実なかたちで斜面要素を表現し、勾配・幅の変動等をも考慮にいれて集中化できる手法をさぐっていかねばならない。

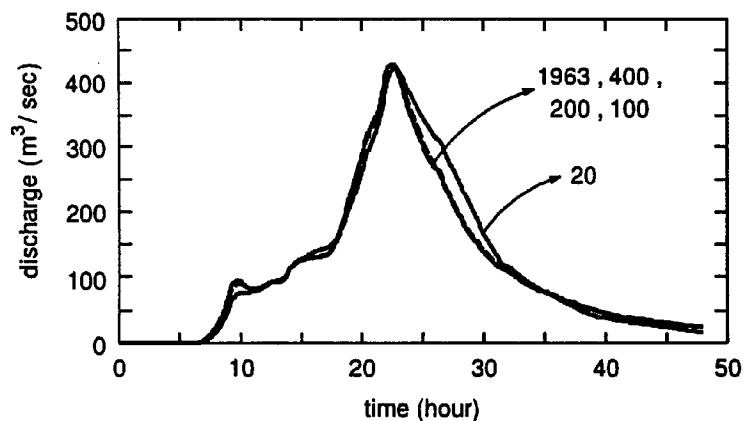


Fig. 16 Four lumped slope runoff hydrographs and the averaged slope runoff hydrograph. Group average method is used for cluster analysis.

参考文献

- 1) Tachikawa, Y., M. Shiiba and T. Takasao: Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure, Water Resources Bulletin, 30, no. 1, pp.9-17, 1994.
- 2) Takasao, T. and M. Shiiba: Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its application to runoff system lumping, J. Hydrol., 102, pp.301-322, 1988.
- 3) 立川康人: 分布型流出予測システムの構成とリモートセンシング情報による流域場特性の取得に関する研究, 第3章, 京都大学学位論文, pp.33-47, 1995.
- 4) 高棹琢馬・椎葉充晴・市川 温: 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, 第38巻, pp.809-812, 1994.
- 5) 高棹琢馬・椎葉充晴・市川 温: 構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 水工学論文集, 第39巻, pp.141-146, 1995.