

流域内地形量の統計解析による流出過程の集中化

Lumping runoff processes by statistically analyzing basin topography

市川 温*・椎葉充晴**・立川康人***

by Yutaka ICHIKAWA, Michiharu SHIIBA, and Yasuto TACHIKAWA

We developed a method to lump runoff processes of slope systems taking into account a distribution of basin topography. In our method, we measure topographic quantities such as slope length and so on by using the Basin Geomorphic Information System (BGIS), and lump slope systems by using the cluster analysis technique on the assumption that the similarity of runoff characteristics among slope elements is evaluated with that of topographic characteristics. Applying our method to an actual basin, we obtained the following conclusions: (1) Our method reduced an amount of runoff calculation to about one-20th of that without employment of our method, (2) Coefficient of variation of a topographic quantity was valid for the criterion for giving the number of clusters.

keywords : Lumping, Topography, Basin Geomorphic Information System, Cluster analysis technique

1. はじめに

近年、従来より大きな枠組のなかで流出解析を行なう機会がふえている。たとえば、大陸河川の流出予測を行なったり、あるいは気象系モデルと水文系モデルとの結合を考えるような場合である。こうした流出解析では、対象流域の規模がかなり大きくなる。

一般に、大規模な流域の流出系モデルを構成する場合、複数の集中型モデルを空間的に配置し、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、流域内の状態量、地形量の空間的变化を考慮するという方法がとられることが多い。

この方法は、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、個々のモデルが計算する状態量は、そのモデルが担当する領域の平均的な値にしか過ぎない。上に述べたような気象系モデルと流出系モデルの結合を考える場合には、この方法では不利である。

仲江川¹⁾は、対象領域内の土壌水分量や地表面温度といった地表面物理量の空間的分布を考慮して蒸発量を算定し、地表面物理量の分布が算定蒸発量に与える影響について検討している。その結果、物理量の分布を考慮して算定した蒸発量と、物理量の領域内平均値を用いて算定した蒸発量との間には明らかな差異があることを確認し、領域内の蒸発量を算定するには、物理量の分布を考慮する必要があると結論している。

領域内の土壌水分量の空間的分布をもたらす原因には、降水の空間的分布、土地利用など様々なものが考えられる。地表付近の水の側方への流動もその原因のひとつであろう。たとえば、山腹斜面に空間的に一様な雨が降ったとする。降水直後の土壌水分量は空間的に一様に分布しているであろう。しかし、十分に時間が経過すると、山頂付近の土壌は比較的乾いており、山麓や河道付近の土壌はかなり湿っているものと思われる。これは、地形の効果によって雨水が側方に流動することで、地表付近の水分が再分配されたためである。

このように、地表付近の水の側方への流動は、土壌水分量の空間的な分布に大きな役割を果たしており、ひいては蒸発散という過程を通じて気象系の現

* 学生員 工修 京都大学大学院博士後期課程
(〒606 京都市左京区吉田本町)
** 正会員 工博 京都大学防災研究所教授
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)
*** 正会員 工博 京都大学防災研究所助教授
(同上)

象にも影響を与えている。こうした気象系-水文系の相互作用を考える場合には、ひとつのモデルが担当する領域内の状態量の分布を知る必要があり、集中型モデルでは不十分であることが多い。かといって、従来提案されてきた分布型モデルの考え方で逐一状態量を計算すると、対象流域が大きいに多大な手間と時間を要し、現実的とはいえない。やはり何らかの手法で、状態量や流域場特性の分布を考慮しつつ流出過程を集中化することが必要である。

筆者らはこれまで、河道網内の状態量の空間的な分布に仮定を設けて河道網の流出過程を集中化するモデルを提案してきた²⁾が、ここでは流域内に分布する地形量を統計的に分析することによって山腹斜面系の流出過程を集中化する手法を提案する。

2. GIS を利用した流出過程の集中化

2.1 概要 流域地形の構造・特性が、流出形態や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³⁾は、流域地形情報システム BGIS (Basin Geomorphic Information System) を開発した。BGIS は、グリッド型の地形情報データセットを加工することで、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、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(斜面長、斜面勾配、河道長など)を抽出できるという特長を有している。

本研究ではまず、BGIS を用いて対象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。

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)

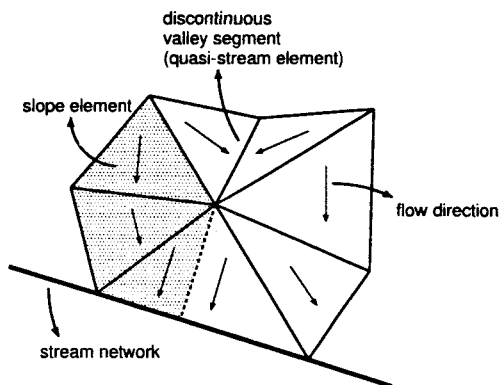


図-1 地形モデル

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授受される過程を取り扱えなければならない。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が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で、その河道区分への斜面流出に寄与する斜面要素を特定でき(図-1)、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。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の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(図-1)。

以上より、BGIS で作成される地形モデルは、(i) 斜面要素、(ii) 準河道要素、(iii) 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

のうち、斜面要素と準河道要素について地形特性量を抽出し、統計解析手法を利用して流出過程を集中化し、集中型斜面モデル・集中型準河道モデルを構築する。河道網については、筆者らが提案してきた河道網集中型 kinematic wave モデル²⁾を利用する。

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⁴⁾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⁴⁾と同様である。地形特性の分布を考慮して流出過程を集中化する、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。

2.2 で述べたように、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。その流出寄与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。ここで、水源、河川合流点、流域下端を合流点と総称すると、河道区分とは、合流点から隣り合う合流点までの河道部分のことである。

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。流出過程に影響する他のパラメタは空間的に一様であると仮定すれば、これら二変量の組が似ている斜面要素はその流出特性も似ているということになる。実際には土質条件、土地利用など他のパラメタの分布も考慮すべきであるが、今回は、流出特性の類似性を地形量の類似性のみで評価して斜面の流出過程を集中化する。具体

的には、地形量の似ている要素をクラスター分析でグループ化し、各クラスターの平均的な要素の流出特性がそのクラスターに含まれる要素の流出特性を代表すると考える。

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

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

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^2 、 s_g^2 はそれぞれ斜面長、斜面勾配の分散を表す。

クラスター間の非類似度は最短距離法 (Nearest Neighbour 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。

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

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⁵⁾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。

本モデルでも集中型斜面モデルと同様、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と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 $q_A(t)$ をあてて、各代表要素からの流出高を kinematic wave モデルで計算する。集中

型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。

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

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数、 $\overline{Q}_i(t)$ は第 i クラスターの代表要素からの流出量、 $\overline{L}_i$ は第 i クラスターの代表要素の河道長、 L_j^i は第 i クラスターのなかの第 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²⁾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、と仮定する。この変化率を $q_0(t)$ とすると、河道区分 i の上流から距離 x 離れた地点の流量は $Q_i(x, t) = Q_i(0, t) + q_0(t)x$ と書ける。すると、 $q_0(t)$ は (4) 式で与えられる。

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

$O(t)$ は河道網からの流出量、 $I_i(t)$ は河道網への流入量、 M は流入河道区分の数、 N は河道網を構成する河道区分の数、 L_i は河道区分 i の長さである。

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) があるとすると、 $A_i(x, t)$ は $q_0(t)$ を用いて次のように表される。

$$A_i(x, t) = K_i \{Q_i(0, t) + q_0(t)x\}^{P_i} \quad (5)$$

$A_i(x, t + \Delta t)$ を河道網に沿って積分して得られる貯留量を $S_I(t + \Delta t)$ とし、河道網内の貯留量に関する連続式を台形公式で差分展開して得られる貯留量を $S_C(t + \Delta t)$ とする。 $S_I(t + \Delta t)$ 、 $S_C(t + \Delta t)$ はともに $q_0(t + \Delta t)$ の関数なので、両貯留量を等しくする $q_0(t + \Delta t)$ を求め、流出量 $O(t + \Delta t)$ を計算する。

3. 適用と考察

3.1 服部川流域における出水の再現 以上述べてきた手法を、淀川上流の服部川流域 (約 95km²) に適用した。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、河道区分数は 719、準河道要素数は 123、斜面要素数は 1963 となった。図 - 2 に斜面要素の散布図を示す。横軸は斜面長 (m) で、縦軸は斜面勾配 (°) である。

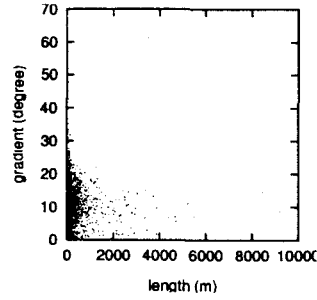


図 - 2 要素の散布図

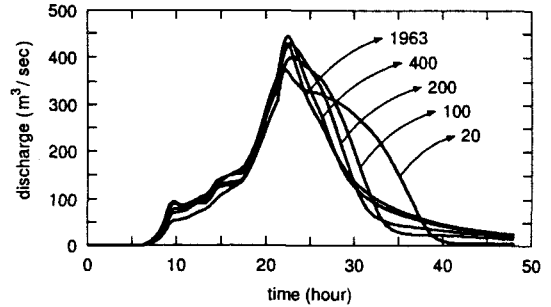


図 - 3 集中型斜面モデルの計算結果

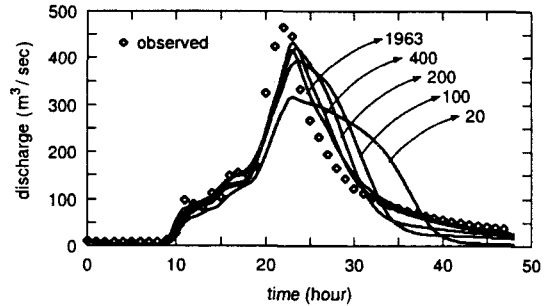


図 - 4 流域下端での流量ハイドログラフ

BGIS の流出計算機能を使って対象流域の流出特性を調べたところ、河道網系での滞留時間は短く、斜面系の効果が支配的であることがわかった。そこで、準河道モデル、河道網モデルの集中化の程度は固定し、斜面モデルの集中化誤差についてのみ検討した。

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クラスター分析を施していない場合の斜面流出とをあわせて 図 - 3 に示す。また、集中型斜面モデルの計算結果を集中型準河道モデル、集中型河道網モデルの入力として求めた流域下端の流量ハイドログラフを 図 - 4 に示す。斜面要素クラスターの数

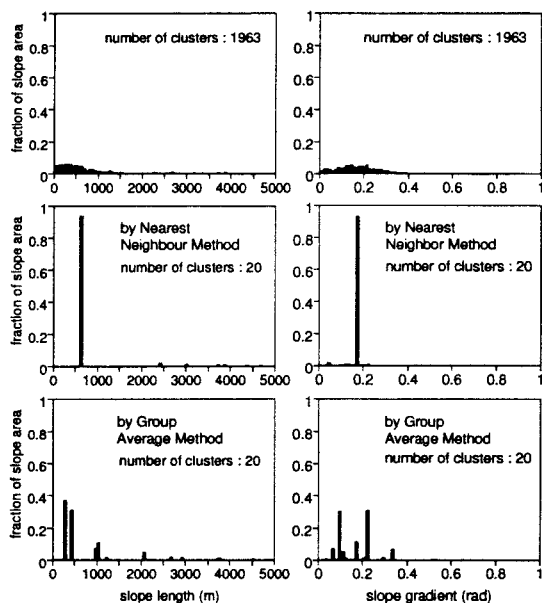


図-5 斜面要素のヒストグラム：左列は斜面長、右列は斜面勾配

増やすにしたがって、ハイドログラフの形状が改善されていく。これはクラスター数を増やすことで地形量の分布がよりよく再現されたためと思われる。

3.2 クラスター分析と地形特性分布の関係 斜面要素クラスターの数を増やすことによって地形特性の分布が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で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、クラスターの数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、より効率的に地形特性分布を近似できないだろうか。

図-5 は、左列が斜面長の、右列が斜面勾配のヒストグラムである。縦軸はある階級に含まれる斜面要素が全流域面積に対して占める割合である。

図-5 上段は、クラスター分析を施していない生のデータのヒストグラム、中段は最短距離法によって20のクラスターに分類したときのヒストグラムである。斜面長・斜面勾配ともに、中段のヒストグラム、すなわちクラスター数が20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。上段のヒストグラムにはそのような階級は存在していない。この巨大な階級は最短距離法の鎖効果によって生じたと考えられる。

もう一度、斜面要素の散布図 図-2 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が形成されていると考えられる。このクラスターの存在が流出計算の精度を下げているようである。

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た。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、

$$d_{tr} = (A_p d_{pr} + A_q d_{qr}) / A_t, \quad A_t = A_p + A_q \quad (6)$$

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。

図-5 下段に、群平均法によって20のクラスターに分類したとき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く近似しているといえる。

図-6 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。図-3 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。クラスター数が100の時点で、すべての斜面要素について計算した結果とほぼ一致しており、集中型斜面モデルを用いない場合に比べて流出計算の回数を約20分の1に減らすことができた。

3.3 統計指標の導入 より定量的に地形量の分布の変化を調べるために、地形量の変動係数を求めた。図-7, 8 は、それぞれ斜面長、斜面勾配の変動係数をプロットしたものである。図の横軸はクラスターの数である。

斜面長、斜面勾配ともに (i) クラスター数を増やすにしたがい、変動係数が一定値 (= 生データの変動係数) に近づく、(ii) 最短距離法より群平均法の方

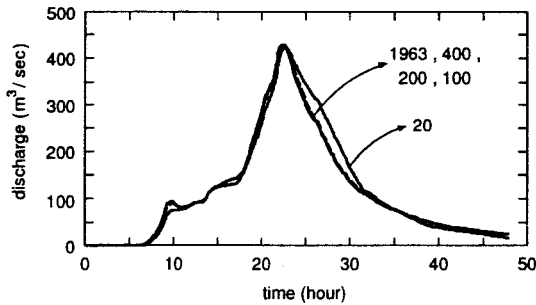


図 - 6 群平均法を用いた集中型斜面モデルの計算結果

がはやく一定値に近づく、という傾向を示している。
(i) の傾向は、図 - 3, 4, 6 でクラスター数を増やすにしたがって計算精度が向上することを裏付けるものであり、(ii) の傾向は、最短距離法より群平均法を用いた方が計算精度が良いことを裏付けるものである。とくに群平均法の場合、クラスター数が 100 の時点で変動係数が生データのそれとほぼ一致しており、図 - 6 において、クラスター数が 100 の計算結果とクラスター分析を施していない場合の計算結果とがほぼ一致していることに符合している。このことは、地形量の変動係数がクラスターの分類数を決める基準になりうることを示している。

4. おわりに

本研究ではまず、BGIS を利用して、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出過程を集中化した。

これらの集中化されたモデルと河道網集中型 kinematic wave モデルを実流域に適用し、特に斜面系の集中化誤差について検討した。その結果、今回の対象流域のような河道効果の小さい流域では、斜面要素のクラスター数が出水過程の再現性に大きく影響することを明らかにした。また、地形量のヒストグラムをとってクラスター数の変化に伴う地形特性分布の変化の様子を調べたところ、最短距離法の特徴である鎖効果が現れており、より効率的に地形量の分布を近似するには、最短距離法はやや不適当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、同じクラスター数でも流出計算精度が向上し、また、集中型斜面モ

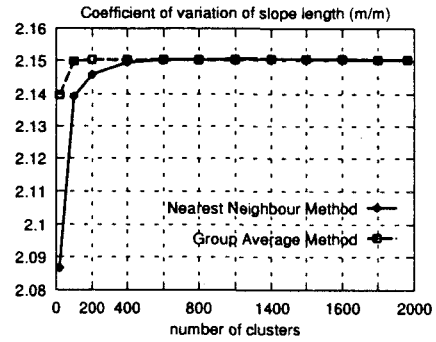


図 - 7 斜面長の変動係数

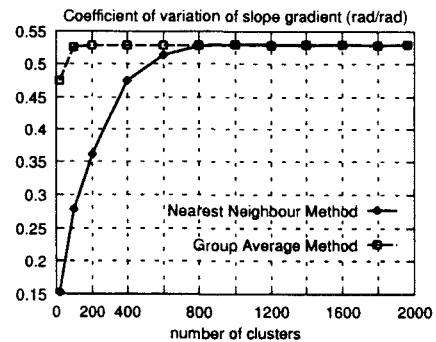


図 - 8 斜面勾配の変動係数

デルを用いない場合に比べて流出計算の回数を約 20 分の 1 に減らすことができた。さらに、地形量の変動係数を調べることで地形量の分布と流出計算結果との関係を調査し、地形量の変動係数がクラスター数の決定基準となりうることを示した。

今後の課題としては、(i) 準河道、河道網の集中化誤差について検討すること、(ii) 斜面要素の勾配・幅の変動等をも考慮にいれて集中化できる手法をさぐるものの二点が挙げられる。

参考文献

- 1) 仲江川敏之・沖 大幹・虫明功臣：サブグリッドスケールの物理量分布を考慮したマクログリッド蒸発量の算定，水工学論文集，第 38 巻，pp. 167-172, 1994.
- 2) 高橋琢馬・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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.