

国土数値情報を用いた水文地形解析に関する基礎的研究

高棹 琢馬・宝 馨・溝渕 伸一・杉原 宏章

A BASIC ANALYSIS OF GEOMORPHOLOGIC FEATURES OF DRAINAGE BASINS AND CHANNEL NETWORKS BASED ON THE DIGITAL NATIONAL LAND INFORMATION

By *Takuma TAKASAO, Kaoru TAKARA, Shin-ichi MIZOBUCHI*
and *Hiroaki SUGIHARA*

Synopsis

This paper describes automatic data processing systems for analysis of geomorphologic features of drainage basins and channel networks, using general purpose computers and the Digital National Land Information released by the Geological Surveying Institute, the Ministry of Construction. The systems formerly proposed by the authors are improved and expanded. The method of analysis, which is called the GM method in this paper, makes it possible to analyze the geomorphologic features more objectively and automatically than conventional methods and to show the three-dimensional structure of the basins. The authors give a general procedure of the analysis and apply it to ten river basins (190 ~ 870 km²) in Japan. Various characteristic values based on the Horton-Strahler stream number and the link magnitude are obtained and compared. The threshold value defining the first-order stream is also discussed.

1. はじめに

従来の流域地形解析は地形図を原資料として必要な情報を抽出しており、(1) 地形図の縮尺が2万5千分の1, 5万分の1等に限定されていること, (2) 一次河道(河道最上流端)の認定方法が確立されていないこと, (3) 作業が非常に煩雑であること, (4) 地形情報の判読規準に個人差があること, などの難点があった。しかし, 近年, 計算機の大容量化・高速化に伴い, 大量の地形データの統計処理が迅速に行えるようになってきており, 流域地形の解析法の改変(客観化・省力化)が可能になりつつある。また, 地形に関するデジタルな情報の整備が鋭意進められ, 例えば国土地理院では地形情報のデータベースとして国土数値情報(the Digital National Land Information)を提供している。

以上のことを踏まえて, 筆者らは, これまで省力化・客観化を指向した水文地形解析システムを提示してきた¹⁾²⁾³⁾。本論文では, 取り扱う内容・システムをさらに拡張した水文地形解析システム(GM法(大型計算機(General purpose computer)を用いたメッシュ(Mesh)法の略)と呼ぶことにする)を提示して, 新たに得たいくつかの知見をとりまとめた。GM法は, 国土数値情報の標高データファイル(KS-110-1), 流路位置ファイル(KS-272)および流域界・非集水線位置ファイル(KS-273)を大型計算機で処理するものであり, 位数・マグニチュードに基づく河道網系の地形量, 流域の三次元特性を算

定・解析することができる。これにより、日本全国の多数の流域を対象として解析するとともに、国土数値情報の水文地形解析への適用の可能性を明らかにする。

水文地形解析を計算機を使って行う場合に、流域図にメッシュをかけてそのメッシュで囲まれた区画（あるいはメッシュ交点）のデータ（これはデジタルマップと呼ばれる）を処理する方法がある。この方法は高速化・大容量化した計算機の利用を前提にしたものであり、こうしたアプローチが近年の一つの方向となっている。特にメッシュや三角形などの分割要素で規定された標高データ群を DEM (digital elevation model) と呼び、例えば、Lawrence (1986)⁴⁾ はメッシュに基づく DEM により流域の分割を行うための手法を提案している。本論文では、水文地形を解析するシステムの 1 つとしてメッシュ交点の標高データを処理する手法を提示し、これを簡単に「メッシュ法」(あるいは「デジタルマップ法」)と呼ぶことにする。

本論文の構成は次の通りである。2. ではここで取り扱う河道網の地形則について簡単に述べる。3. で GM 法の具体的内容を示す。4. で擬河道網およびその決定規準について考察を加える。5. で GM 法の実流域への適用例を示す。6. はまとめである。

なお、メッシュ法による解析結果はメッシュ間隔の大きさ（メッシュスケール）に依存する。この点に関する基本的検討を付録に示しておいた。

2. 水文地形に関する法則

本論文では位数およびマグニチュードに基づく河道網系の地形量の算定結果から、システムの水文地形解析への適用性に関して考察を加える。以下で位数およびマグニチュードに基づく地形則を簡単に説明する。

2.1 位数理論と統計則⁵⁾

河川流域へのアプローチは、地形学・地理学・水文学などさまざまな分野からなされているが、個々の流域地形の自然的特性を定量的に把握することは、各分野に共通する基本的課題である。流域地形の特性を定量的に把握・表現しようとする学問すなわち計量地形学 (quantitative geomorphology) の分野では、Horton-Strahler の位数理論を基礎として、経験的に得られた次のような 4 つの地形則がある。これらに関する多数の研究については、高山の著書⁶⁾に詳しい。

- [1] 河道数則 $N_u = R_b^k \cdot u$
- [2] 河道長則 $L_u = L_1 R_b^{u-1}$
- [3] 集水面積則 $A_u = A_1 R_b^{u-1}$
- [4] 河道勾配則 $S_u = S_1 R_b^{1-u}$

ここに、 N_u は位数 u の河道数、 L_u 、 A_u および S_u はそれぞれ位数 u の河道の平均的な長さ、集水面積及び勾配を表す。また、 k は対象流域の最下流河道の位数であって、最大位数と呼ばれる。

$R_b = N_u / N_{u+1}$, $R_l = L_u / L_{u+1}$, $R_a = A_u / A_{u+1}$, $R_s = S_u / S_{u+1}$ はそれぞれ、分岐比、河道長比、集水面積比、河道勾配比と呼ばれる無次元量であり、一流域においてはほぼ一定値をとるといわれている。この点に関しては、筆者らの検討²⁾³⁾を参照されたい。

2.2 マグニチュード理論と統計則

河川の地形特性を定量的に扱う Horton に始まる研究をうけて、Shreve は位数理論にかわるマグニチュード理論を提案した⁷⁾。この理論は河道網構成最小単位であるリンクに、それより上流にあるソース数で定義されるマグニチュードを付けて、河道網のトポロジー構造を把握、表現しようとしたものである。マグニチュードの定義より、外部リンク、すなわち位数 1 の河道のマグニチュードは 1 であり、マグニ

チュード i_1 と i_2 の 2 つのリンクが合流してできる内部リンクのマグニチュードは $i_1 + i_2$ となる。

岩佐・小林 (1978)⁸⁾ は、河道網の形成過程のランダム性を考慮して、マグニチュード i のリンクの位数の期待値 u_i およびソース数 n の河道網におけるマグニチュード i のリンク数の期待値 m_i^n を確率論的に次式のように導いた。

$$u_i = \sum_{u=2}^{[\log_2 2i]} u \cdot (Z_i)_u / Z_i \quad ([\] \text{ はガウス記号})$$

$$m_i^n = \sum_{j=1}^J j \cdot (Z_n)_{ij} / Z_n \quad J = [n/j]$$

ここに、 Z_n はトポロジー的に異なる河道網 (topologically distinct channel networks, TDCN) の総数、 $(Z_i)_u$ はマグニチュード i のリンクの位数が u である TDCN の数、 $(Z_n)_{ij}$ はマグニチュード i のリンクを j 本持つ TDCN の数を表し、

$$\begin{aligned} Z_n &= 2^{n-2} C_{n-1} / n \\ (Z_i)_u &= 2^{i-2} \quad (u=2) \\ &= \sum_{j=2^{u-1}}^{[i/2]} 2^{i-2j} \cdot {}_{i-2}C_{i-2j} \cdot (Z_j)_{u-1} \quad (3 \leq u \leq [\log_2 2i]) \end{aligned}$$

$$(Z_n)_{ij} = (Z_i)_{2n-2} P_{n-1} \cdot (n-i \cdot j)!$$

で与えられる。

また、Jarvis は河道網の節点に関して高さという新しい概念を提案した⁹⁾。ここでいう高さとは、河道最上流端 (ソース)、合流点の各節点から河道最下流端に至る一連のつながりの中に含まれるリンク数で定義される。高さの概念から得られる河道網のトポロジー構造を表わす指標としては、対象河道網に含まれるすべてのソースの高さの最大値である最大ソース高さ D_n 、およびこれらのソースの高さの算術平均である平均ソース高さ E_n が提案されている。その他の指標としては、平均外部リンク長 LE 、平均内部リンク長 LI 、平均外部リンク勾配 SE 、平均内部リンク勾配 SI 等がある。

3. GM 法の内容

近年のコンピュータの進歩は、多量のデータを迅速に処理することを可能にした。それに伴い、コンピュータの導入による流域地形解析作業の省力化が進められている。本章では国土数値情報の概要および GM 法の内容を示す。

3.1 国土数値情報の概要¹⁰⁾

地理的情報のデジタル化、すなわち、地図に表現されている内容を情報工学的手法を導入して数字や符号に変換したのが国土数値情報である。この新しい形態の情報は、数表や統計書と同様にデジタル情報ではあるが、地図と位置の関係の対応が付けられるなど地理的性格も保有している。

紙数の都合で詳細は文献 10) および 3) に委ねることにして、ここでは、用いる 3 つのデータファイルの内容について述べる。

(a) 標高データファイル (KS-110-1)

国土数値情報の「標準メッシュ・システム」の中で 1/25000 地形図の大きさに相当するものは 2 次メッシュと呼ばれる。これを縦横 10 等分した 3 次メッシュをさらに縦横 4 等分する方眼 (約 230 ~ 315

m 間隔、緯度によって異なる) の格子点での標高値 (ラスター型データ) がファイル化されている。ファイルの作成に際し、原資料として 1 / 25000 (一部 1 / 50000) 地形図が用いられている。特別に、9999,8888,7777,6666 と記録されている場合があり、順に陸水面、海水面、等高線なし、埋立地であることを示す。なお、標高データは 10 m か 20 m ごとに丸められて記録されている場合が多いようである。

(b) 流路位置ファイル (KS-272)

流路位置の 2 次メッシュ内の正規化座標と水系域コード、河床標高値等の情報がベクター型データとしてファイル化されている。このデータファイルの作成には 1 / 25000 地形図を使っているが、多くの細流は省かれ、流路位置データの上流端は地図上の水線記号をさらに上流へ延ばしたところに位置している。流路延長の際の規準は「地形図上で河川記号または枯川記号で表示されている流路とそれに連続して等高線で谷筋として判断、追跡可能な区間を記録」となっている。また、流路位置情報のデータベース化に際して、曲線状の流路は折れ線で近似され、折れ線ともとの曲線の距離は一定の値を越えないようにしてある。河床標高値データは上流端の点については必ず記録されているが、合流点も含めて河道の中間点では欠測 (記録値 0) の場合が多い。上流部付近では 10 m 毎に丸められて記録され、標高値に著しい変化の見られない下流部では丸める幅が小さくなるようである。標高値の変化の小さな下流側に欠測が多く確認される。なお、今回取り扱った水系のうち、熊野川水系上流部の北山川や宮川水系では流路の連続しないところが多数見られた。他の水系についても流路の連続状態を示す TAG 番号に明らかに誤りとわかるものが数例確認された。データファイルの使用に際して、各水系でこのようなデータの不備がないことを確かめておく必要がある。

(c) 流域界、非集水界線位置ファイル (KS-273)

流域界線位置の 2 次メッシュ内の正規化座標と、その流域界線位置左右の各水系域コード、単位流域コードの情報、非集水界線位置の 2 次メッシュ内の正規化座標等のベクター型データをファイル化したものである。このデータファイルも 1 / 25000 地形図を原資料として流路位置ファイル (KS-272) と同様に作成したものである。

3.2 デジタルマップに基づく河道網特性の解析

対象とする流域に直交するメッシュをかけ、交点の標高データを得る。こうしたメッシュに基づく一群のデータセットはデジタルマップと呼ばれる。このデジタルマップを用いて、流域に降る雨滴をメッシュ交点間の 8 方向のうち最急勾配方向に追跡する。メッシュ交点を結ぶこの追跡線を落水線と呼ぶ。あるメッシュ交点から落水線を流域の外に開いている谷の出口まで辿る。区域内の全てのメッシュ交点を始点として落水線を辿ったとき、ある点を通過する落水線の頻度がその点までの集水面積をあらわす。すなわち、1 メッシュあたりの面積に落水線の通過頻度を乗ずることにより各メッシュ交点での集水面積が得られる。この追跡のためのプログラムは野上 (1986)¹¹⁾ によって提示されている。言語を BASIC から FORTRAN に移植し、そのままでは不都合を生じる場合があるので、多少手を入れて用いた¹⁾。Fig. 1 は、落水線図の 1 例 (由良川大野ダム上流域 (大野川)) である。

落水線図は、実際の河道とはかなり異なり、3 つ以上の落水線が合流する点が多数存在するので、通常の河道網の解析には馴染まない。谷の出口から上流方向へ落水線通過頻度の大きい点を辿って行けば、実際の河道網に近い形的水系図が得られる。そこで、その頻度に適当なしきい値をもうけて、そこから河道が始まると考える。例えば、しきい値を 10 とすると、河道網の各上流端はその地点より上流側に 10 個以上のメッシュ交点を有することになる。すなわち、しきい値が大きくなれば細流が省かれ、粗く表現された水系図が得られる。こうして得られる河道は実際の河道を近似的に表したものと見なせるので、これを筆者らは擬河道網と呼んでいる²⁾³⁾。Fig. 2 は Fig. 1 の落水線図においてしきい値を 6 および 10 とした場合に得られる擬河道網である。この擬河道網の特性について解析を行う。

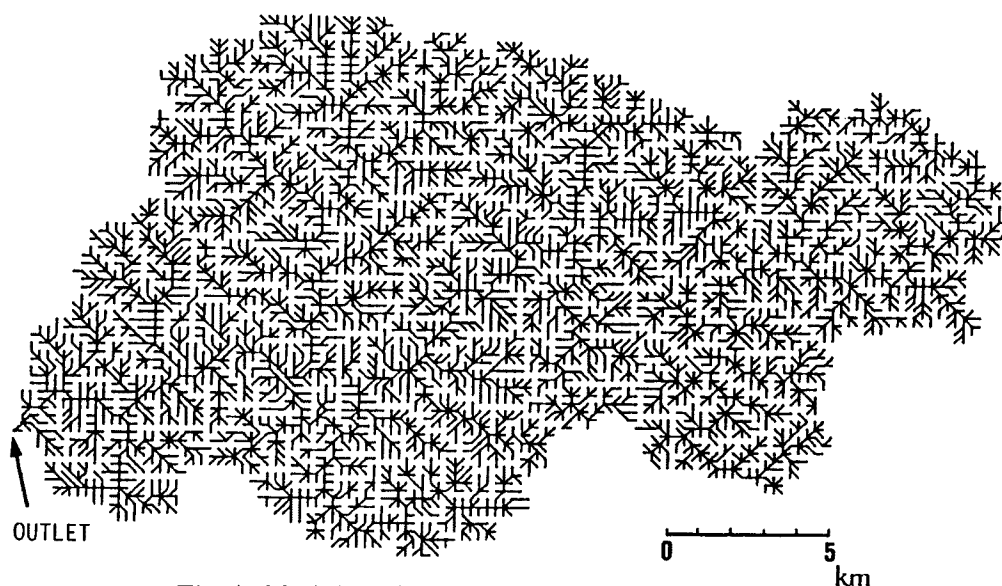


Fig. 1. Mesh-based stream-line network. (Ohno river)

3.3 GM 法の具体的内容

筆者らはまず、標高データファイル (KS-110-1) を基データとしてデジタルマップを作成し、大型計算機を用いて流域の地形解析を試みた。ところが、同程度の標高値が分布する平野や盆地等の地域では落水線がでたらめな蛇行を描いたり、あるいはループを形成して流域の出口まで追跡できない場合があることを確認した³⁾。このような平坦な地形では、基データとしてデジタルマップだけを用いたのでは落水線の追跡が困難となる場合があるので、流路位置ファイル (KS-272) を併用することで、こうした困難を避けるようにした。以下はGM法のアルゴリズムである。また、フローチャートを Fig. 3 に示す。

① 3次メッシュ単位で配列さ

れている標高データを並べ直して対象流域を覆うデジタルマップを自動作成する。3.1 で述べたように、標高データには特別な場合として 9999, 8888, 7777, 6666 等の値が記録されており、順に陸水面、海水面、等高線なし、埋立地であることを示す。データ処理の際、9999 は周囲 8 交点のうちの最低標高値に

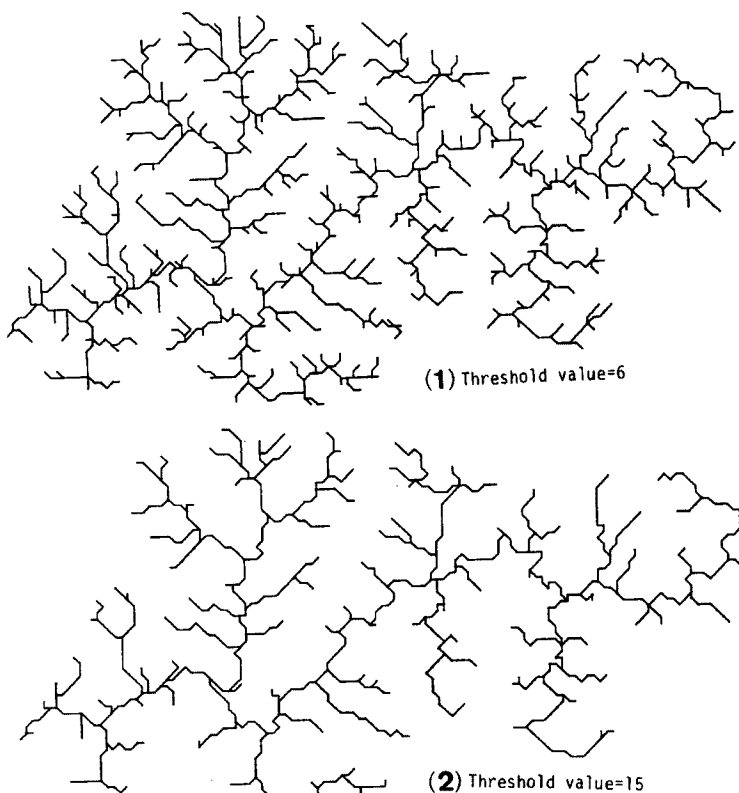


Fig. 2. Quasi-stream networks.

(1) Threshold value=6; (2) Threshold value=15)

置きかえ、8888は0とした。また、今回の対象流域内には7777、6666は存在しなかった。いずれの場合にも周囲の標高値から推定値を生成する処理を考えればよい。

② 流路位置ファイル (KS-272) から流路位置の座標データを読み取り、その1つ1つのデータについて①で作成したデジタルマップの最近傍のメッシュ交点に置換する。すなわち、流路位置ファイルに記録されている河道に関して、メッシュ交点間の落水線の追跡方向を決定する。

③ ②で決定した落水線が通るメッシュ交点の標高値を、流路位置ファイル (KS-272) の河床標高データより求める。3.1で述べた通り、上・下流端や合流点付近以外での河床標高データの多くは欠測となっており、このような流路位置での河床標高値は最近傍の上下流2点での値から内挿して求めた。C点での河床標高値は上下流側のAB地点の河床標高値から次式によって求める。

$$H_C = (H_A - H_B) \cdot L_{CB} / L_{AB}$$

ここに、 H_i は地点*i*での河床標高値、 L_{ij} は*ij*間の流路長を表す。

求めた標高値を①のデジタルマップの標高値と置換し、新たなデジタルマップを作成する。窪地等の問題に対処するために落水線を逆勾配方向に追跡することも許す。このため、以上の手続きを経ずに擬河道の縦断面図を描くと、なめらかに流下するような図が得られない場合があるが、流路位置ファイルを併用して求めた落水線に関しては標高値が上流側から下流側へとなめらかに推移することになる。

④ 落水線の追跡を行う。②で一部の落水線の方角をあらかじめ決定することにより、平坦な地形での落

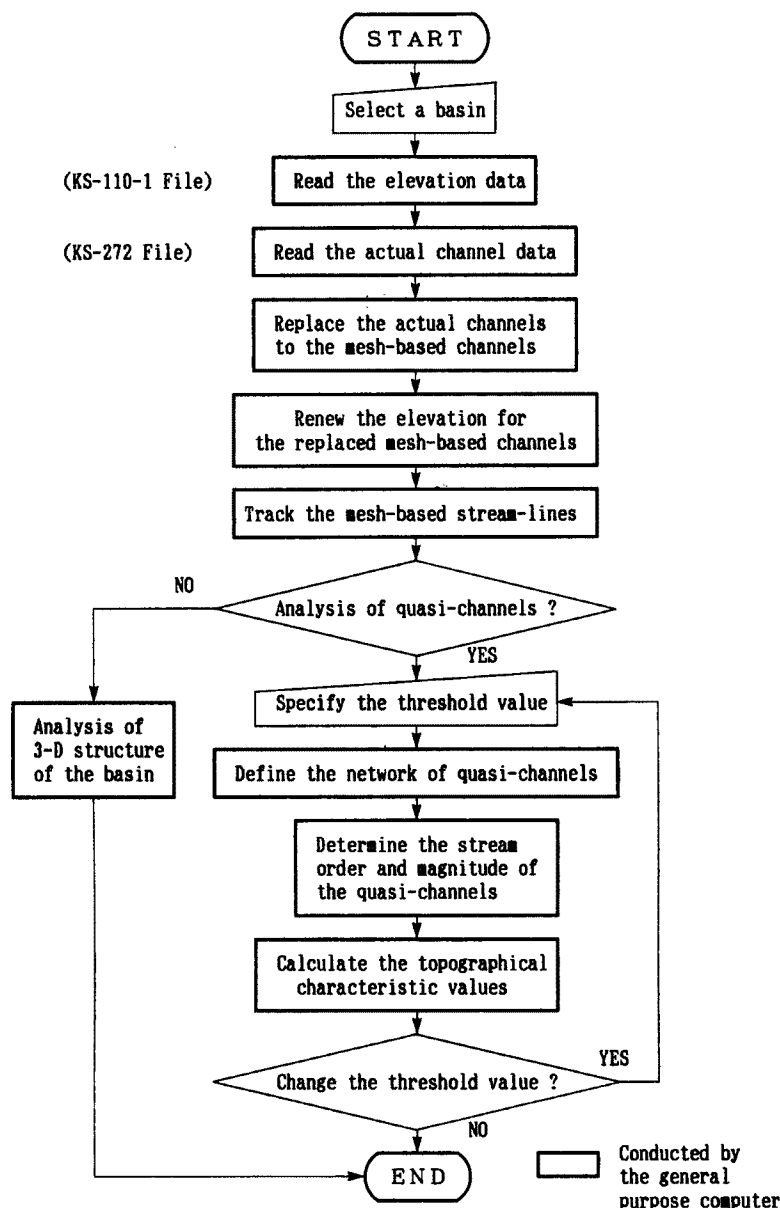


Fig. 3. Flow chart of the GM method.

水線の追跡が容易になる。

⑤ しきい値を定めて（すなわち擬河道網の最上流端を決めて）、擬河道網を確定する。

⑥ 擬河道網について以下のことを行う。

- ・位数およびマグニチュードのナンバリングを自動的に行う。
- ・位数毎の擬河道の数、長さ、面積、勾配を算定する。
- ・分岐比、河道長比、集水面積比、河道勾配比などを算定する。
- ・ N (C_u), N_u をカウントする。
- ・マグニチュードに関する地形量を算定する。

⑦ 落水線のネットワークから求められる流域の方向、集水面積等のデータを用いて流域の三次元的構造を解析する。

なお、デジタルマップ作成の際、流域界・非集水界線位置ファイル (KS-273) を利用して、流域外を除外した。この過程は本質的ではないが、④以後の計算時間が短縮できる。

4. 擬河道網の決定規準に関する考察

水文地形解析の精度を上げるためには現実の河道網に近い擬河道網を作成することが望ましい。擬河道のソース（河道の最上流端）は落水線の通過頻度によどのようなしきい値を設けるかによって決まる。では、このしきい値をどのような値に設定すればよいのであろうか。ここでは、「最適なしきい値」を「1/50000 地形図上の河道網と擬河道網の地形特性量が最も良く一致している擬河道のしきい値」と定義する。地形特性量としては、 N_1 （河道の最上流端数）、 N_2 （位数2の河道数）、 R_b （分岐比）、 R_l （河道長比）、 R_s （河道勾配比）、 D_n （最大ソース高さ）、 E_n （平均ソース高さ）、 SE （外部リンクの平均勾配）、 SI （内部リンクの平均勾配）、 LE （外部リンクの平均長）、 LI （内部リンクの平均長）を選んだ。ただし、 R_b 、 R_l 、 R_s は最大位数を含めずに算定した。1/50000 地形図の水線記号から得られる水系網を再現する最適なしきい値を以下の10流域について調べた。国土数値情報に収められている各河川の水系域コードを（ ）内に示す。

野洲川 (86061)、日野川 (87073)、桂川 (86061)、重信川 (88087)、天神川 (87072)、
安曇川 (86061)、大野川 (86060)、愛知川 (86061)、古座川 (86290)、日置川 (86289)

4.1 各地形特性量から見た最適なしきい値の比較検討

Table 1 は地形特性量ごとの最適なしきい値をこれら10流域についてまとめたものである。この表から以下ことがわかる。

- (1) 野洲川、天神川、安曇川、大野川については、 SE 、 SI 、 LE 、 LI を除く地形特性量について定めた最適なしきい値が各流域ごとにほぼ一定である。
- (2) (1) の4流域以外では最適なしきい値にばらつきが認められる。
- (3) 各地形特性量についてそれぞれ見てみると、最適なしきい値は流域によって異なる。

また、擬河道網が地形図の河道網の幾何学的形状をよく再現しているかどうか（擬河道網の再現性）を判定するために、ソース数 (N_1) の再現性をその規準とすることは妥当であると思われる。そこで N_1 について定めた最適なしきい値に着目して、他の地形特性量から定めた最適なしきい値と比較する。

- (4) N_1 について最適なしきい値と比べて N_b 、 SE 、 SI についての最適なしきい値は小さい値をとる傾向にある。これは、「地形図上では河道のソース数は平野部には少なく山地部で多いが、擬河道網では流域全体に均一にソースが存在する」ことに起因すると考えられる。このような擬河道網の傾向は **Fig. 4**、**Fig. 5** に表されている。擬河道網では平野部にソースが増えるため、 SE 、 SI の値は小さくなり、高次の

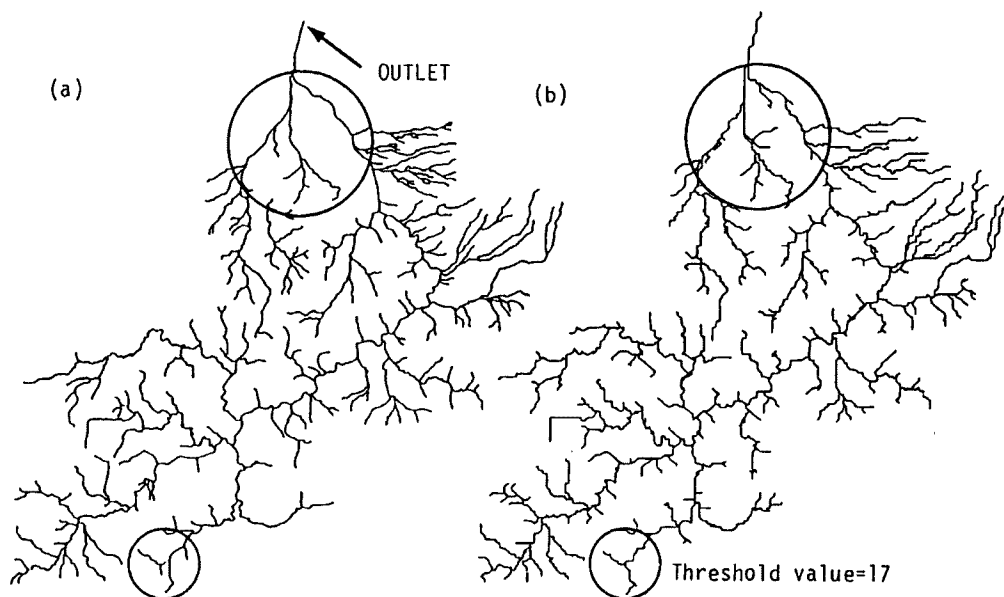


Fig. 4. Actual stream network based on the topographical map of 1/50000 (a) and quasi-stream network (b). (Hino river)

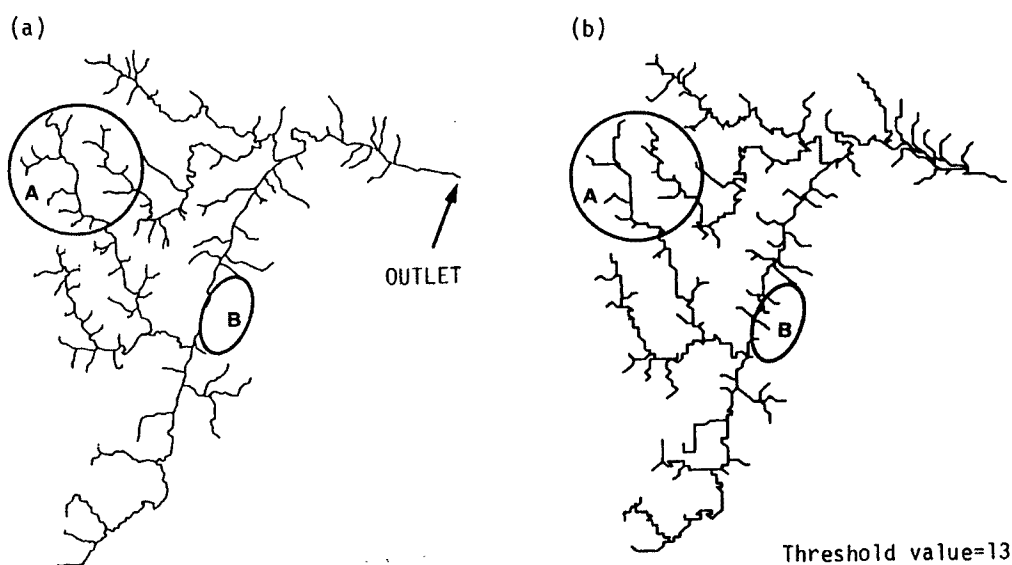


Fig. 5. Actual stream network based on the topographical map of 1/50000 (a) and quasi-stream network (b). (Ado river)

擬河道に合流する1次の擬河道の割合が増えて N_2 が小さくなる。一方、 LE 、 LI についての最適なしき値は N_1 についての最適値よりも大きい値をとるようである。これは、擬河道は河道を直線的に短く近似していることが要因である。

N_2 、 SE 、 SI などがよく適合するようにしき値を定めると、擬河道網の N_1 は地形図から得られる N_1 よりも大きい値となり、 LE 、 LI に着目するとその逆となる。

しき値を変えていった場合に見られる N_2 、 SE 、 SI の変化の様子を見ても。Fig. 6, Fig. 7はこの3つの地形特性量としき値の関係を重信川と日野川について示したものである。実線は1/50000地形

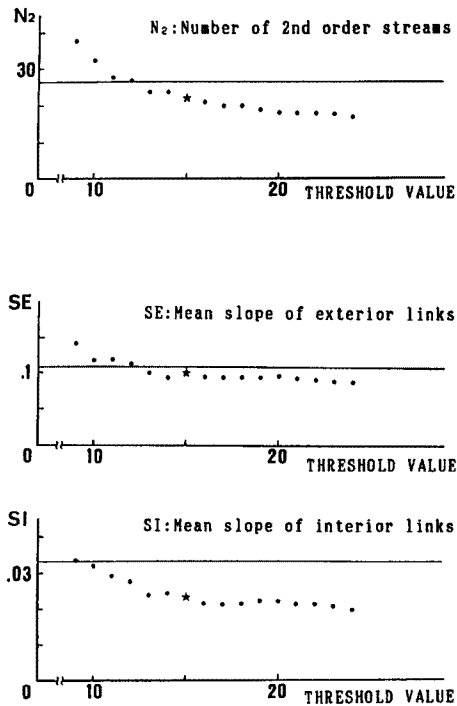


Fig. 6. Relationships between the threshold values and the topographical characteristic values. (Sigenobu river)

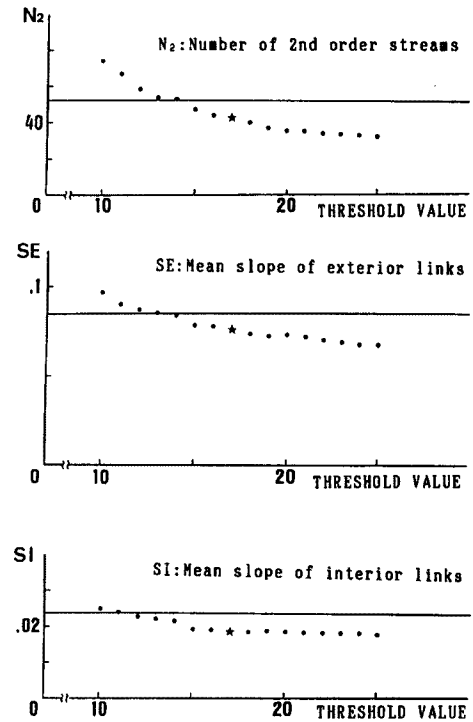


Fig. 7. Relationships between the threshold values and the topographical characteristic values. (Hino river)

図上の河道網の特性量の値を表す。 N_1 について最適なしきい値はTable 1より重信川では15, 日野川では17であり, このしきい値に対しては星印をプロットした。星印は実線より下にあり, 次のことがわかる。

(5) ほぼ同じソース数 (N_1) をもつ地形図上の河道網と擬河道網を比較した場合, N_2 , SE , SI とともに

Table 1. Optimal threshold values to each topographical characteristic value

Drainage basin	Drainage area		N_1	N_2	R_b	R_l	R_s	D_n	E_n	SE	SI	LE	LI
	A_1 (km ²)	A_2 (km ²)											
Yasu River	285	288	17	17	17	15	17	17	17	15	11	20	17
Hino River	870	876	17	14	9	9	9	19	19	13	11	18	16
Katura River	814	811	8	6	7	10	9	11	10	5	5	9	7
Sigenobu River	460	462	15	12	13	11	10	17	18	12	9	13	14
Tenjin River	475	491	22	23	20	21	20	21	21	19	21	24	23
Ado River	290	307	13	12	13	12	11	13	13	13	8	13	10
Ohno River	344	354	8	7	8	10	7	7	7	7	8	10	8
Echi River	192	199	16	15	13	20	13	16	16	14	10	16	14
Koza River	357	344	14	10	11	15	14	14	17	12	14	17	13
Hiki River	399	401	11	8	18	6	6	13	13	9	6	13	13

擬河道網の方が小さくなる。

次に、しきい値と地形特性量の関係を野洲川を例にとって Fig. 8 に示す。また Fig. 9 に地形図から得られた野洲川の水系網としきい値 10, 17, 20 の擬河道網を示す。今回調べた他の 9 流域とも共通な特徴であるが、 LE , LI , SE , SI , E_m , D_m , N_2 はしきい値の変化に対して連続的に変動するが、 R_b , R_l , R_s はしきい値が 1 変わると値が大きく変わる箇所がある（大野川の例は文献¹⁾²⁾³⁾に示されている）。 R_b , R_l , R_s

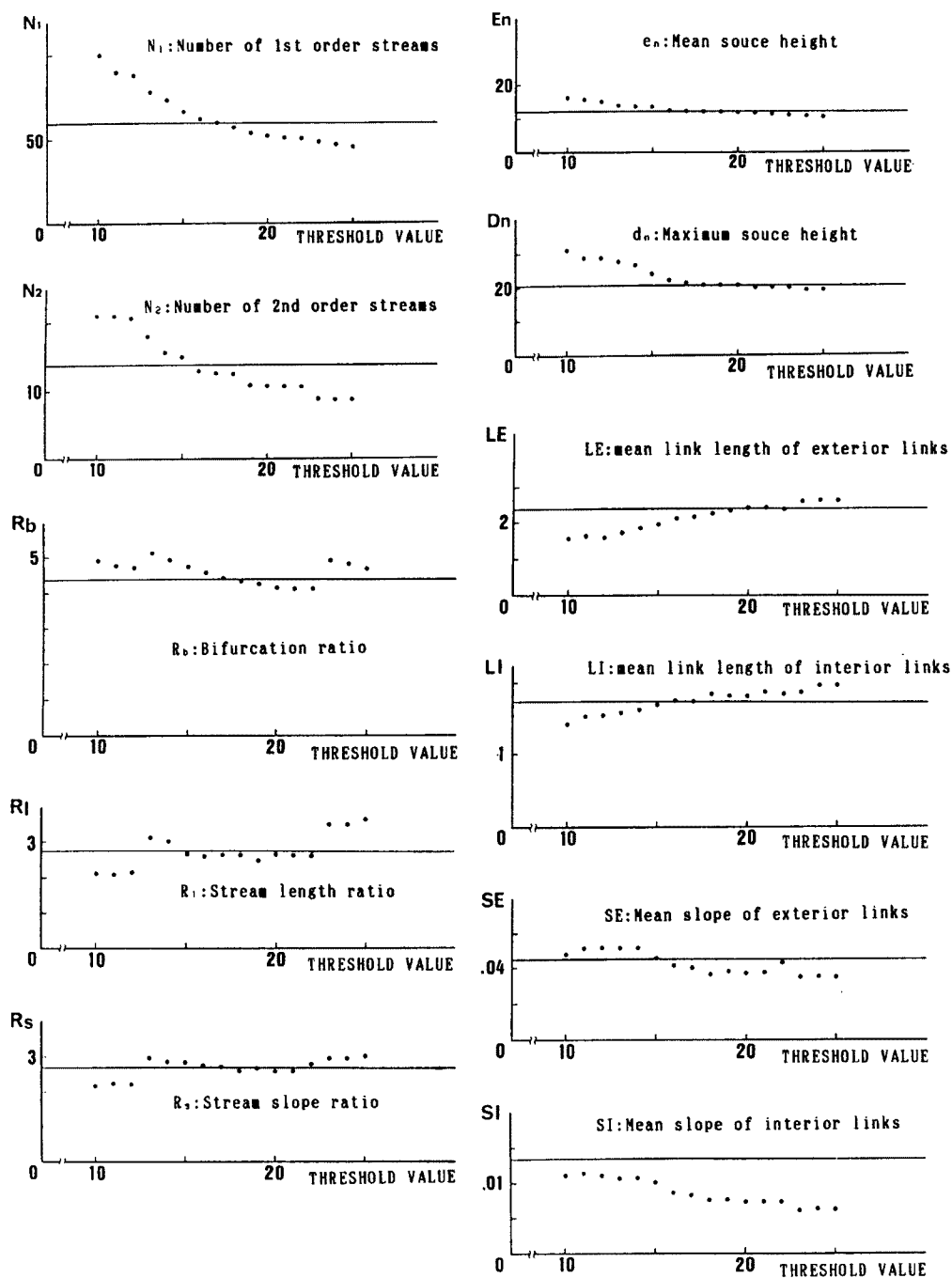
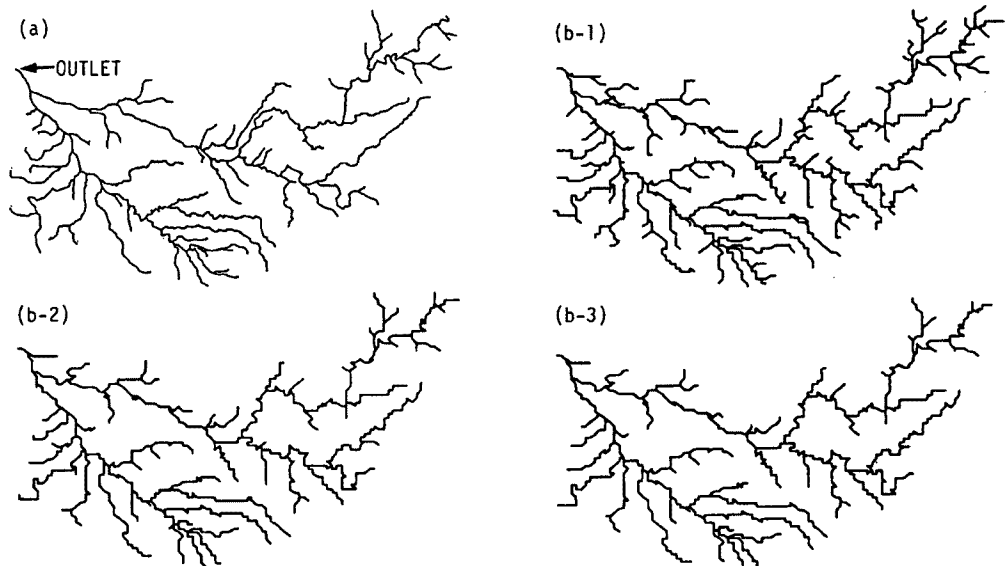


Fig. 8. Relationships between the threshold values and the topographical characteristic values. (Yasu river)



(a) Actual stream network based on the topographical map of 1/50000.
 (b) Quasi-stream network. (1:Threshold value=10;
 2:Threshold value=17;
 3:Threshold value=20.)

Fig. 9. Actual stream network based on the topographical map of 1/50000 (a) and quasi-stream networks (b). (Yasu river)

は、ネットワークにソースを1つ付加するだけで全く異なる値を示すことがあるため、河道網の特性を表す指標としてはリンク数の結合則が成り立つマグニチュードに基づく特性量が適しているといえる。

4.2 流域内の不均一性の影響

水系網の発達を支配する要因には地形・地質・降水量などがある。大野川流域は、地形・地質・降水量などの自然条件が流域内で一様であり、ソースの分布は流域全体ではほぼ一様となっている。よって、流域内での自然条件の地域差を考慮せずに流域全体に一律にしきい値を定めて作成した擬河道網は、地形図上の水系網をそのトポロジー構造において比較的良く再現するといえる。しかしながら、これらの条件が流域内で一様でない場合には、流域内で水系網の発達に差が生じるため、1/50000地形図上の実際の河道網のソースの分布状態に地域差が生じる（たとえば、島野は阿蘇山周辺地域において降水量の条件が一様の流域で地形および地質が水系網の発達に関与する例を挙げている¹²⁾）。この場合には、擬河道網と実河道網の幾何学的形状に大きな差異が生じる。以下にこうした事例について具体的に述べる。

(1) 桂川流域の場合

Fig. 10は桂川流域（流域面積810 km²）の1/50000地形図から得られた水系網（a）としきい値8の擬河道網（b）である。桂川流域の地質の大部分は秩父古生層で、図中に○印を施した地域（亀岡）は沖積層である。○印の部分は、地形図から得られる水系網の河道数に比べて擬河道網の河道数が著しく多くなっている。

(2) 安曇川流域の場合

安曇川を例に見てみる。Fig. 5のA地域では擬河道網（b）より1/50000地形図上の水系網（a）の方がソース数が多く、B地域では逆に擬河道網（b）の方がソース数が多くなっている。あるいは、擬河道網（b）のソースは流域全体に一様に分布しているともいえる。自然条件についてまとめると、地質に

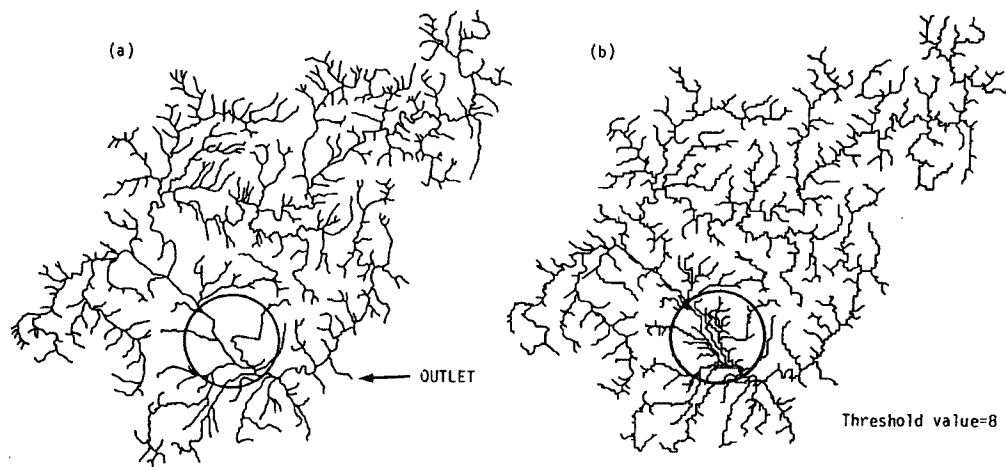


Fig. 10. Actual stream network based on the topographical map of 1/50000 (a) and quasi-stream network (b). (Katura river)

については A 地域が三畳系粘板岩で B 地域は二畳系粘板岩である。また気候区分のうえでは A 地域は日本海側気候に属し、B 地域と比べて雪の影響を強く受け、降水量が多い。また安曇川流域は中央を河川に沿って南北に走る花折れ断層と東側の山麓に沿って走る 2 つの断層が存在する¹³⁾。水系網の発達に気候および断層が少なからず影響を及ぼしているのではないかと推測される。

4.3 まとめ

流域全体に一律のしきい値を与えて落水線から擬河道網を作成し、1/50000 の地形図から得られる河道網の再現性を調べた。流域内の地形、地質、降水量が一樣であれば、野洲川、天神川、安曇川、大野川のように流域全体に一律のしきい値を定めることによって、擬河道網は地形図より得られる河道網を良く再現する。しかし、水系網の発達は地形・地質・降水量の影響を受けるため、これらの自然条件が流域内で一樣でない流域においては、擬河道網の作成の際に地形・地質・降水量などの条件を考慮して地域的にしきい値を変えることが望ましい。そうすることによって、幾何学的形状および地形特性量の一致という面で精度のより良い河道網の再現が可能であると考えられる。

5. GM 法の実流域への適用例

本章では GM 法を多数の流域に適用して得られた結果を示す。対象流域は 4. で扱った 10 流域である。5.1 では GM 法により得られた流域の三次元的構造を示す図について述べる。5.2 ではマグニチュードに基づくトポロジ的ランダム性の検討を行う。

5.1 流域の三次元構造の把握

(1) 縦断面および集水面積

河道勾配は、河道網の平均的な分布とともに流域構造を把握するうえで基本的な情報である。主落水線に対して縦断面図を作成し、また、擬河道上の各点での集水面積をあわせて図示する。Fig. 11 は主落水線の縦断面と集水面積を示したものである。縦軸は標高値および集水面積を、横軸は流域出口からの距離を表す。集水面積の折れ線が大きくジャンプするのは大きな流域の河道が合流するためである。

(2) 部分流域の方向

Fig. 12 は、主落水線に流入する部分流域の大きさと方向（「流域の方向」については付録の付. 1 節を

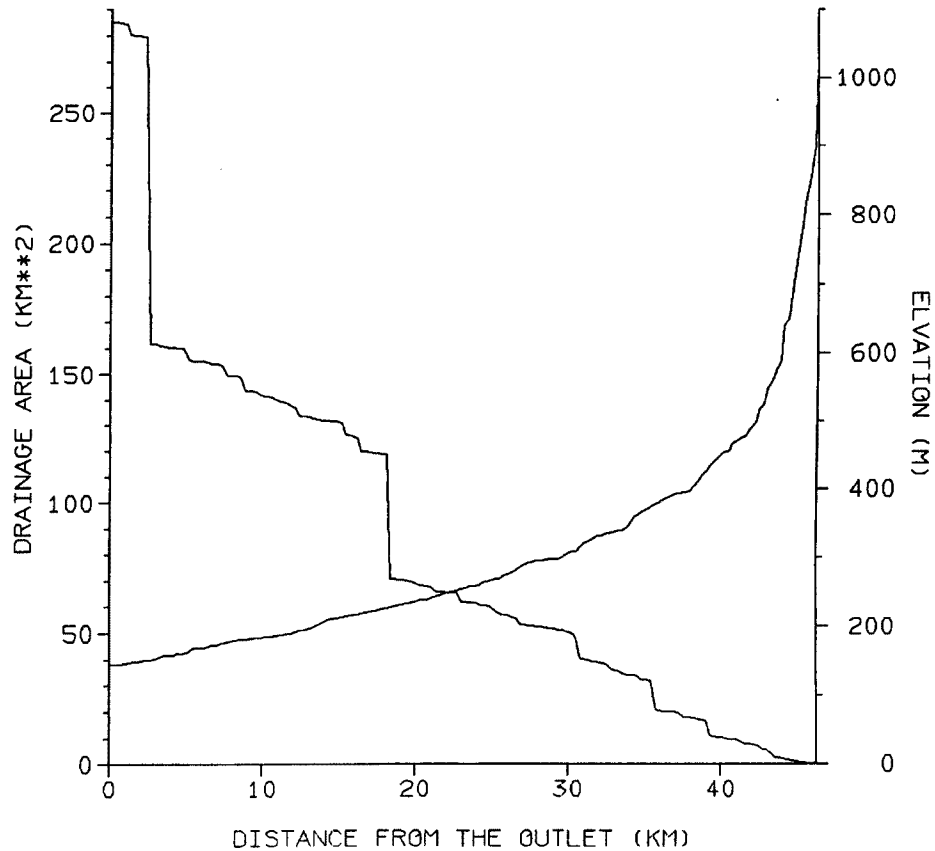


Fig. 11. Vertical section and cumulative drainage area of the main mesh-based stream-line.

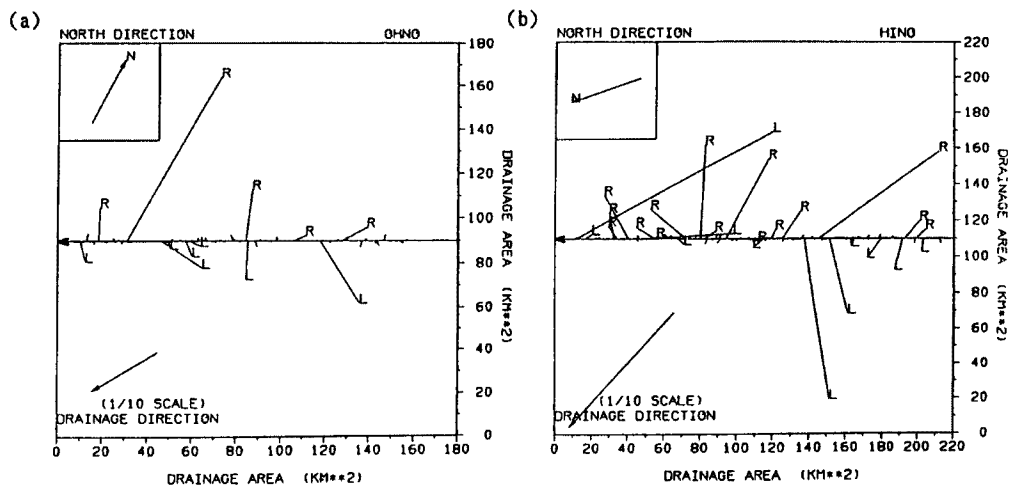


Fig. 12. Size and direction of the tributaries. (a) Ohno river (b) Hino river)

参照されたい。)を示した図である。図中、左向きの中央の矢印は主落水線の上流端から下流端へと引いた直線で、矢頭が下流端にあたる。その矢印の上下に多く描かれている線は主落水線に流入する部分流域の方向と集水面積を表し、その線分長が図郭に示された集水面積と対応する。なお、流域の方向は付録の

Fig. 16 に示したように落水線のベクトル和として求め、Fig. 12 (a), (b)の左下隅に示し、矢印の長さは流域全体の集水面積を表す（1/10の縮尺で表した）。3.0 km以上の集水面積を有する流域については、その流域が主落水線の右・左岸のいずれの側に流入するかをR（右岸）、L（左岸）で区別する。擬河道の曲がり具合によりRが矢印の下側に、あるいはLが矢印の上側に付記される場合があり、そうした例は日野川水系（Fig. 12 (b)）等に見られる。左上の枠囲みの中に北の方向を示してある。

結局、Fig. 12 は部分流域の方向・合流の仕方とその集水面積を示すものである。豪雨特性の1つとしてその移動方向が洪水流出特性に影響を及ぼすことが過去の研究で明らかにされている。Surkan (1974)¹⁴⁾ はネブラスカの自然流域での応答を簡単な分布型のモデルを用いて検討した。仮想豪雨を0.1～1.8 m/s (3.6～64.8 km/hr) の速さでいろいろな方向に移動させて上下方向の移動によるピーク流量の変動が6倍にも及ぶことを示した。

また、宝¹⁵⁾および三谷ら¹⁶⁾は豪雨特性が洪水流出特性に及ぼす影響を系統的に検討し、雨域の移動による流出ハイドログラフの違いは流域の上下流方向では大きく、雨域が下流方向へ移動する方が上流方向へ移動する時よりもピーク流量は常に大きく、ピーク生起時刻も早いことを数値実験により明らかにしている。こうした認識に基づいてFig. 12を見ると、洪水災害の生起を考えるうえでどの方向からの豪雨域の通過が危険であるかを視覚的に捉えることができる。もちろん、複数の落水線をまとめることにより流域全体の方向性が示されるということは、個々の流域の地形形状を組み込んだ流域モデルを構築する上で落水線のネットワークを利用することができることを示唆している。

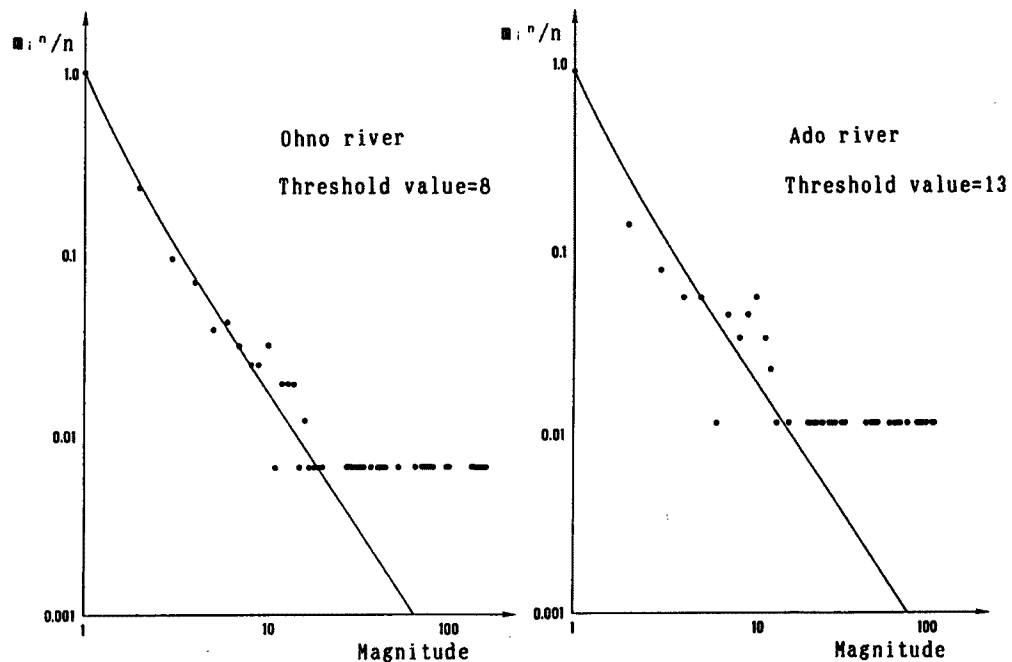
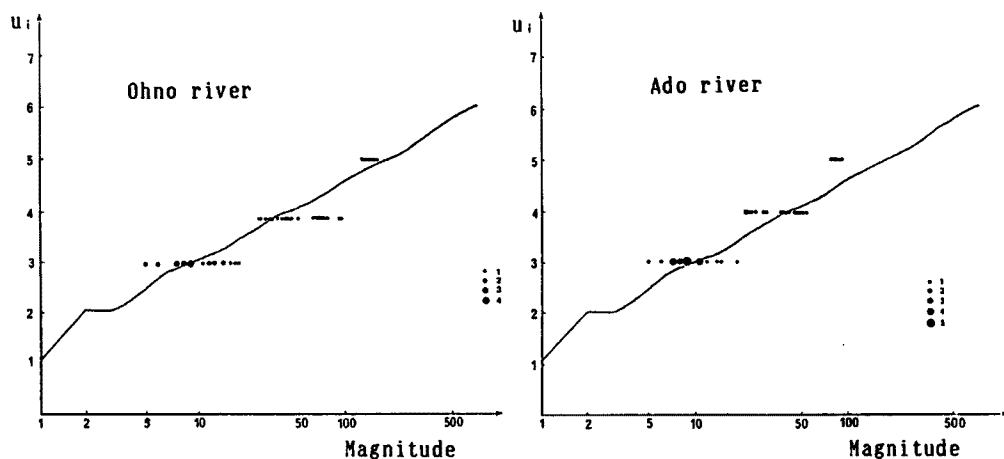
Fig. 11 と Fig. 12 を併せ見ると、流域の基本的な三次元構造が把握できる。

5.2 マグニチュード理論に基づくトポロジー的ランダム性の検討

4. で示した10流域すべてについてGM法を実行して、 N_i について最適と思われる（すなわち、ソース数を再現する）しきい値をもつ擬河道網について2. 2で紹介したマグニチュード理論に基づく諸量を算定した。紙数の都合で大野川と安曇川の結果のみを示す。算定した各マグニチュードのリンク数と m_i^*/n の期待値をFig. 13に示す。しきい値を一律に定めた場合、その水系の特性量が比較的良く再現されることが考えられる大野川と、2つの断層が存在し気候条件が流域内で一様でない安曇川の2つの流域についての算定結果を示した。Fig. 13を見ると、大野川についての算定結果は理論値と比較的良く合っているようである。 m_i^* の期待値を与える式は「地質的影響が強く作用しない場合には、自然の河道網はトポロジー的ランダムである」という仮定より導かれたものである。このことから、大野川に対してはトポロジー的ランダム性の仮定がおおよそ満足されていると推測することができる。安曇川の場合の計算結果は理論値との整合性が他の河川に比べて劣っている。先にも述べたように安曇川流域には中央を河川に沿って南北に走る花折断層と東側の山麓に沿って走る2つの断層があり、さらに、流域内での気候条件も地域的な変化がある。河川の幾何学的形状は断層および降水量の影響を受けていると考えられる。安曇川の場合、このような自然条件が影響してトポロジー的ランダム性の仮定を満足していないようである。

次に、 u_i について期待値とGM法による計算結果をFig. 14に示す。プロットされた黒丸の大きさはデータの数と対応し、その対応関係は図中に説明した通りである。Fig. 14を見る限りでは、安曇川とその他の流域の違いを読み取ることはできない。河道網がトポロジー的にランダムであるかどうかは理論値と計算値を m_i^*/n について比較する方がよくわかるようである。これは u_i が河道リンク数の結合則がなり立たない位数の概念を含む値であるからだといえる。

現段階ではしきい値の決定規準に課題を残しているため、擬河道のトポロジー構造を地形図上の水系のトポロジー構造に置き換えて議論することは適切でないが、擬河道網を解析することにより安曇川に関してはその水系のトポロジー的ランダム性を否定する結果が得られた。今後、しきい値のとり方について検討する一方で、しきい値を小さくするなどして、解析スケール（しきい値）と u_i や m_i^*/n などのマグニチュードに基づく諸量がどう変わるかを知ること興味深いことである。

Fig. 13. Theoretical (denoted by the solid line) and calculated values of m_i^n/n .Fig. 14. Theoretical (denoted by the solid line) and calculated values of u_i .

6. ま と め

本研究では、国土数値情報から地形データを抽出し、抽出したデータを大型計算機で処理する水文地形解析システム（GM法）を構築した。GM法では、国土数値情報の標高データファイル（KS-110-1）、流路位置ファイル（KS-272）および流域界・非集水線位置ファイル（KS-273）からデジタルマップを作成し、そのデジタルマップの各メッシュ交点間を結ぶ落水線のネットワークを生成する。生成したネットワークを解析することによって、流域の三次元構造が把握できる。また、落水線の通過頻度にしきい値を設けて作成した擬河道網に対して、位数・マグニチュードに基づく地形量の自動算定もできるようになっている。

本論文では、GM法の概要とその適用例を示すとともに、このシステムを用いて、地形図から得られる

河道網の地形量とデジタルマップから得られる擬河道網の地形量を比較することによって、地形図上の河道網を擬河道網がどの程度再現しうるかを検討した。

本研究で得られた知見を以下に記す。

(1) 国土数値情報を用いることにより、地形図から手作業によってデータを抽出するという作業の煩雑さが解消でき、さらに、日本全国の任意の流域の地形データを抽出することができる。また、大型計算機を利用すれば大量のデータを高速に処理できるため、流域面積の大きな流域での地形解析が可能となった。

(2) 当該流域の地形的特徴および特性量を迅速・容易に抽出する方法として、デジタルマップに基づく、落水線・擬河道を解析する方法(GM法)は非常に有用である。

GM法では、落水線の集水面積にしきい値を設けて擬河道網を作成し、これに基づいて種々の解析を行う。したがって、このしきい値をどのように適切に定めるかが問題である。しきい値の決定規準についての検討から以下のことがわかった。

(3) 擬河道網の再現性の精度を測る指標として、 N_1 , N_2 , R_b , R_s , R_d , D_m , E_m , LE , LI , SE , SI をとりあげ、これらがしきい値の決定規準として適当かどうかを調べた。 R_b , R_s , R_d は N_1 の僅かな増減によって高次の位数をもつ河道の長さ・本数が敏感に変化する場合もある¹⁾ので、しきい値決定のための規準としては適当ではない。 N_1 の僅かな増減にさほど影響されない N_2 , D_m , E_m , LE , LI , SE , SI がこの目的のための指標として適しているようである。しきい値の決定規準を確立することができれば、擬河道網の再現性の精度を高めることができ、より現実的に即した流域の把握が可能となる。

(4) 地形・地質・降水量などの自然条件が流域内で一様であれば、流域全体に一律のしきい値を与えて得られる擬河道網は、地形図上の河道網をそのトポロジー構造において比較的良く再現する。ただし、流域ごとにその値は異なる。

(5) 上記の自然条件が流域内で一様でなければ、流域全体に一律のしきい値を与えて得られる擬河道網の再現性の精度は良くない。擬河道網の再現性の精度を高めるためには、流域内で部分的にしきい値を変える必要がある。例えば、流域内で比較的起伏量の大きいところ、地質の硬いところ、降水量の多いところなどでは相対的にしきい値を小さくしてソース数を増やすことなどが考えられる。国土数値情報の他のファイル(表層地質に関するもの(KS-156-1)など)を併用することによりこうした場合にも対応していくことができよう。

以上、国土数値情報を用いた水文地形解析の手法と2, 3の応用例を示した。こうしたデジタルマップを用いた手法は、流域地形の解析のみならず、流出解析にも応用されつつあり¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾、将来的には流域水管理へと展開していくものと思われる。本研究で示したようなシステム・手段は、そのための基礎情報を提供するのに有用である。なお、デジタルマップに基づく方法ではメッシュ間隔の大きさ(メッシュスケール)の問題がある。これについて基本的な検討を行った結果を文末の付録に示しておいた。

参考文献

- 1) 溝渕伸一: 流域の地形特性量と解析スケールに関する研究, 京都大学工学部特別研究論文, 1987.
- 2) 宝 馨・高棹琢馬・溝渕伸一: 水文地形解析の自動化の試み, 第32回水理講演会論文集, 1988, pp. 25-30.
- 3) 宝 馨・高棹琢馬・溝渕伸一・杉原宏章: コンピュータを用いた水文地形解析序論, 京大防災研年報, 第31号B-2, 1988, pp. 325-340.
- 4) Lawrence, E. B.: Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models, Water Resour. Res., Vol. 22, No. 1, 1986, pp. 15-24.
- 5) たとえば, 金丸昭治・高棹琢馬: 水文学, 朝倉書店, 1975, pp. 149-178.

- 6) 高山茂美：河川地形，共立出版，1974，pp. 22-74.
- 7) Shreve, R. L.: Statistical law of stream numbers, J. Geol., 74 (1), 1966, pp. 17-37.
- 8) 岩佐義朗・小林信久：マグニチュード理論による河道網の連結構造に関する統計則と指標，土木学会論文集，第 273 号，1978，pp. 35-48.
- 9) Jarvis, J. S.: New measure of the topologic structure of dendritic drainage networks, Water Resour. Res., Vol. 1, No. 5, 1972.
- 10) 建設省国土地理院，国土庁調整局：国土数値情報，大蔵省印刷局，1987.
- 11) 野上道男・杉浦芳夫：パソコンによる数理地理学演習，古今書院，1986.
- 12) 島野安雄：阿蘇山周辺地域における水系網解析，ハイドロロジー，第 18 巻 (1)，1988，pp. 22-33.
- 13) 滋賀県琵琶湖研究所：滋賀県地域環境アトラス，1988.
- 14) Surkan, A. J.: Simulation of storm velocity effects on flow from distributed channel networks, Water Resour. Res., Vol. 10, No. 6, 1974, pp. 1149-1160.
- 15) 宝 馨：豪雨特性が洪水流出に及ぼす影響に関する数値実験的検討，昭和 61 年度科学研究費補助金（自然災害（1））研究成果報告書（代表・小尻利治），1987，pp. 151-164.
- 16) 三谷裕次郎・宝 馨・高棹琢馬：豪雨特性が洪水ハイドログラフに及ぼす影響に関する検討，土木学会関西支部年次学術講演概要集，1987，II-45.
- 17) 岡 太郎・安田史生：メッシュ標高データ（国土数値情報）の洪水解析への応用，土木学会関西支部年次学術講演概要集，1988，II-72.
- 18) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：レーダー雨量情報に対応する分布型流出モデルの検討，第 33 回水理講演会論文集，1989，pp. 91-96.
- 19) 高棹琢馬・椎葉充晴・立川康人：流域地形に対応した準 3 次元斜面要素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，1989，pp. 139-144.

付録 メッシュスケールの大きさが解析結果に及ぼす影響についての検討

GM 法で用いる標高データは約 250 m 間隔（たとえば，京都では緯度線 231 m，経度線 281 m 間隔）のメッシュ交点上のデータである。流域の地形解析をするにあたり，メッシュスケールが解析結果に及ぼす影響を把握しておく必要がある。これについて検討した結果を以下に示す。

1/25000 地形図に 50 m 間隔（図上で 2 mm に相当する）のメッシュをかけ，標高値を地形図から直接に読み取り，50，100，150，200，250 m のメッシュに基づくデジタルマップを作成する。メッシュのラインを 50 m ずつずらすことにより 250 m のスケールについては計 5 つのデジタルマップが作成できる。結局，都合 15 のデジタルマップを用意する。対象流域は由良川福知山水系大野ダム上流部の河内谷川流域（9.8 km²）である。各デジタルマップより作成した落水線図を Fig. 15 に示す。図中黒丸は，最下流端から上流へ向かって集水面積の大きい交点を辿ったものである。これがほぼ主河道に対応するもので，ここでは主落水線と呼んでおく。

メッシュスケールが，①落水線が構成するネットワークの方向，②集水面積と擬河道長，③流域の平均的な勾配，などの特性に与える影響を調べた。

付. 1 落水線が構成するネットワークの方向

落水線追跡の方向と距離をベクトル量として扱い，流域内でのベクトルの総和を算定すると，流域が全体としてどちらの方角を向いているか（「流域の方向」と呼ぶことにする）がわかる。Fig. 16 は流域の方

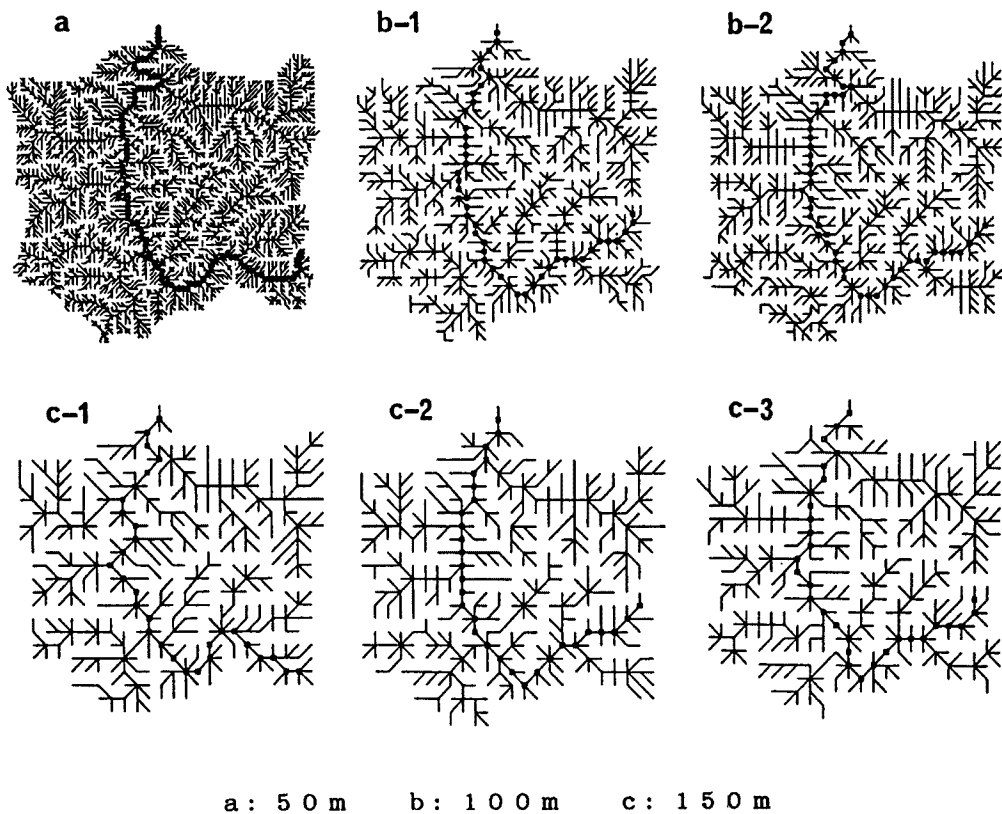


Fig. 15. Mesh-based stream-line networks. (Kawauchidani river)

向の捉え方を模式的に示した図で、この仮想流域の場合、流域の方向は北方向に6，西方向に1である。**Fig. 17**はメッシュスケールを(a) 50 m, (b) 100 m, (c) 150 m, (d) 200 m, (e) 250 mと変えたときに流域の方向がどう変わるかを示したものである。メッシュスケールが250 m以内であればいずれの解析スケールでもほぼ同一の方向性(約24°以内に収まっている)を示すといえる。

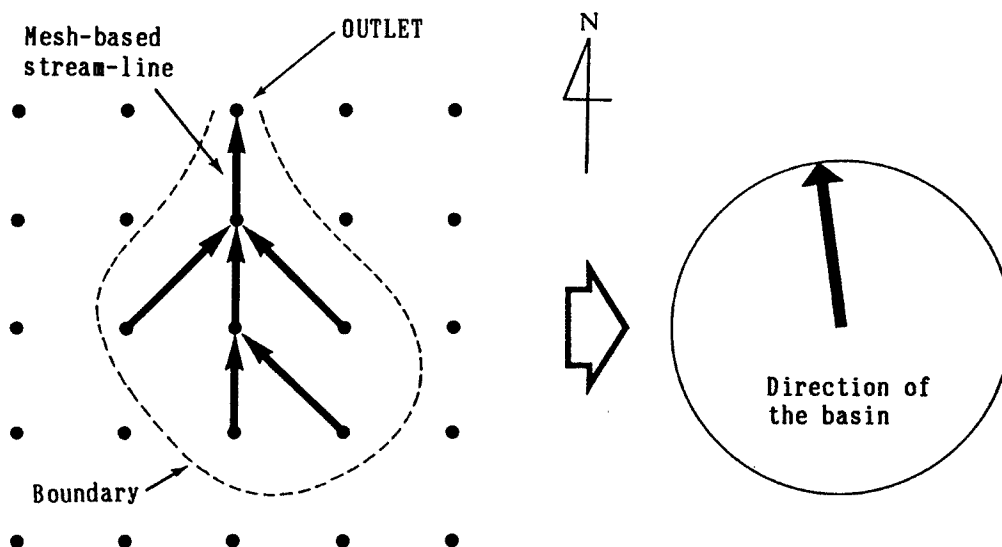


Fig. 16. Direction of drainage basin on the mesh-based stream-line.

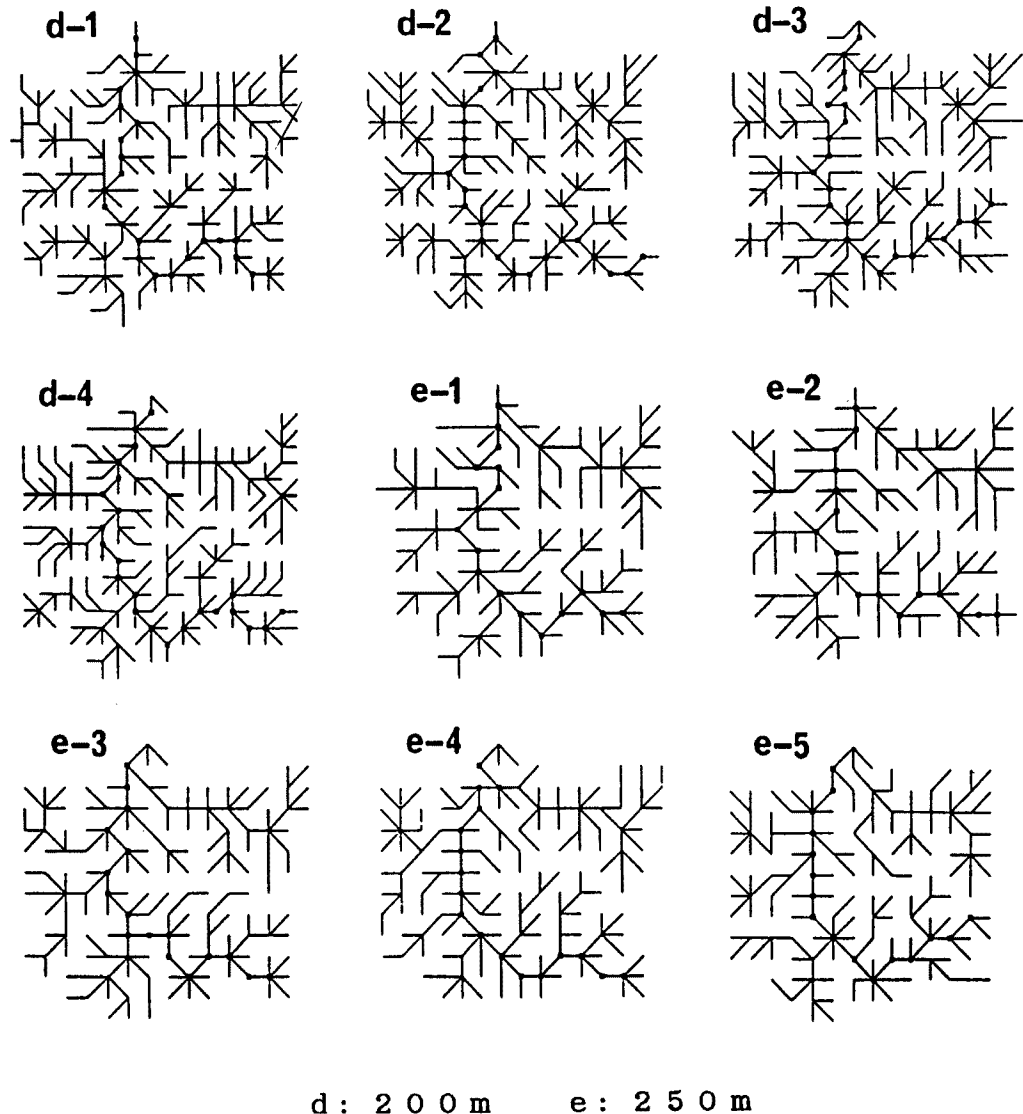


Fig. 15. Mesh-based stream-line networks. (Kawauchidani river) (continued)

付. 2 集水面積と擬河道長

Fig. 18 に各メッシュスケールでの集水面積の算定結果を示す。図中実線は 1 / 25000 地形図をもとに計測した流域面積を表す。いずれのメッシュスケールでもほぼ正確な流域面積 (9.8 km²) が算定できることが分かる。

Fig. 19 はメッシュスケールと主落水線の長さの関係を図示したものである。図中の実線は地形図より計測した河道 (地形図上の水線記号を延長した) の長さ (6.6 km) を示す。**Fig. 15** を参照して (主落水線の最上流の方の形状の差に着目), 同一の河道および谷を再現していると思われる擬河道をケース A (**Fig. 15** の a, c-1, d-1, 2, 4, e-1, 2, 3, 4) とケース B (**Fig. 15** の b-1, 2, c-2, 3, d-3, e-5) に分け, A, B のそれぞれについて長さを算定した。**Fig. 19** から, メッシュスケールを大きくとるに従い河道の長さを実際より短く算定してしまう傾向のあることが認められる。この理由として, 落水線の端点はメッシュスケールが小さいほど流域界近くに位置するということと, メッシュスケールが大きいと細かな曲がり具合を評価できず落水線 (すなわち擬河道) が直線的になり易いことがあげられる。

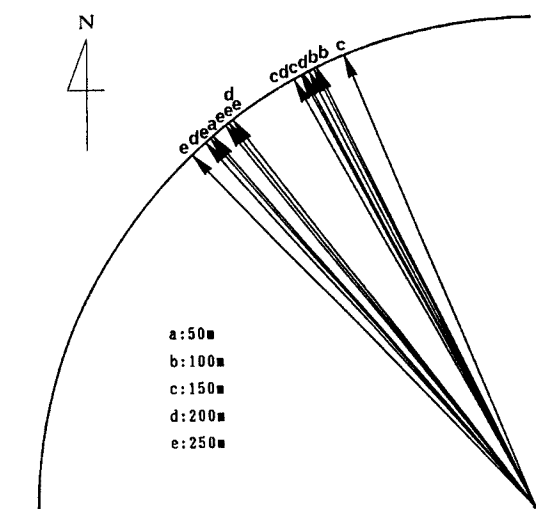


Fig. 17. Relationship between the mesh scale and the direction of drainage basin.

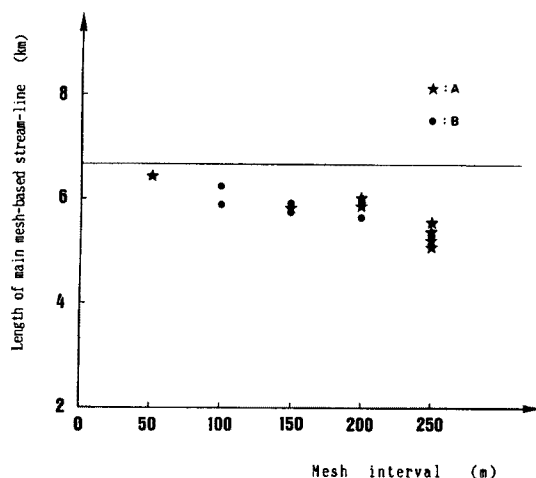


Fig. 19. Relationship between the mesh scale and the length of main mesh-based stream-line.

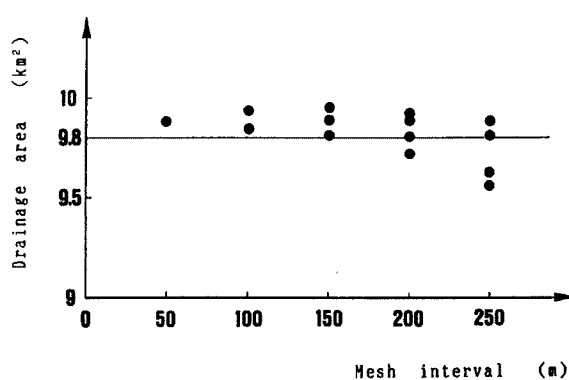


Fig. 18. Relationship between the mesh scale and the drainage area.

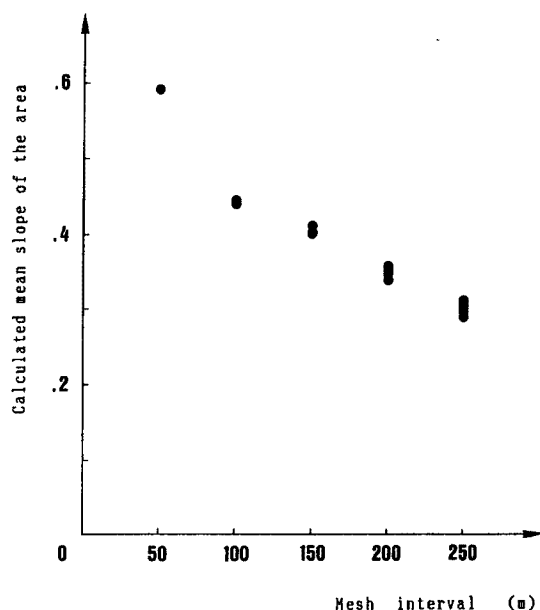


Fig. 20. Relationship between the mesh scale and the mean slope of the area.

付. 3 落水線の勾配

流域内の全ての落水線の平均勾配を算定した結果を Fig. 20 に示す。メッシュスケールを大きくすると算定される平均勾配が漸次小さくなる。地面の勾配を求める際、デジタルマップの方眼は小さいほど精度は高まる。方眼が粗くなると、把握できない起伏が出てくる。どの程度のスケールまでの起伏を考慮したいか（解析の目的）によって適したメッシュスケールもおおのずと異なることになる。

付. 4 ま と め

約 10 km² の大きさの流域について、メッシュスケールが地形特性量に与える影響について検討した。この程度の大きさの流域であれば、河道長および河道勾配を算定するには 250 m のメッシュ間隔では粗いようである。小流域において河道長および河道勾配を算定するためには 50 ～ 100 m 程度のメッシュ間隔が適当である。また、落水線が構成するネットワークの方向および集水面積はメッシュスケールの影響をあまり受けないようである。