

コンピュータを用いた水文地形解析序論

宝 馨・高棹 琢馬
溝淵 伸一・杉原 宏章

AN INTRODUCTION TO COMPUTER-AIDED ANALYSIS OF GEOMORPHOLOGIC FEATURES OF DRAINAGE BASINS AND CHANNEL NETWORKS

By *Kaoru* TAKARA, *Takuma* TAKASAO,
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. The conventional analysis, which required time-consuming manual work based on only topographical maps, has become possible to be reformed because of recent remarkable progress of computers and tractable arrangement of geographical data. The authors develop five systems using computers (personal or general purpose ones) and the Digital National Land Information released by the Geological Surveying Institute, the Ministry of Construction and discuss the merits and demerits of them. The results of the channel network analysis based on the Horton-Strahler stream number are also discussed.

1. はじめに

出水現象の解明には、その生起場である流域地形の量的な把握が基本的に重要である。流域の地形特性を定量化する試みは Horton (1945) の研究にはじまり、その後多くの研究者によって多数の成果を挙げてきた。ところが、これまで流域地形の解析は地形図を用いて手作業的に行なわれてきており、(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、などの難点があった。しかし、近年、計算機のめざましい発達により地形データを迅速に処理できるようになってきており、従来の解析法の改革が可能になりつつある。

筆者らは、本報告で、まずパソコンによる地形解析を行い、その場合の諸問題を検討した。諸問題とは、例えばパソコンで扱おうとするデータ量の制約の問題や地形データの読み取り作業の煩雑さの問題等である。

一方、計算機の普及を反映して、様々なデジタル情報・情報処理システムが整備されつつあり、水文学の分野においても、雨量・水位テレメーターや雨量レーダの即時的観測システムの充実化等が鋭意進められている。こうした近年の趨勢にあって、国土地理院では日本全国の地形情報を網羅したデータを磁気テープに収め、国土数値情報として提供している。

本報告では、パソコンによる地形解析の諸問題を考慮した上で、自動化・省力化をさらに進めるため国

土数値情報を利用した、大型計算機による流域地形自動解析システムを提示する。水文地形解析を日本全国の任意の河川流域において行いうるシステムを開発し、このシステムによりこれまで得られてきた経験的・理論的な地形則の検証、さらには新たな法則性の発見を目標としている。

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。流出解析の分野でも、例えば、市川（1986）¹⁾ は都市域の、川谷・中野・菊田（1988）²⁾ は山地小流域（面積約12ha）の流出解析に、ともに10mメッシュの情報を利用し、山田・藤田・嶋田・洪（1988）³⁾ は複数の山地小流域の流出解析に5m～100mのメッシュ情報を利用している。また、Abbottら（1986）のSHEモデル（欧州水文システムモデル）⁴⁾ も流域のメッシュ分割を行っており、その実流域（面積約10km²）への適用例では250mメッシュを採用している⁵⁾。本報告では、流域地形解析システムの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「メッシュ法」と呼ぶことにする。

また、河道網系の解析を行う場合メッシュ法よりも正統的な方法として、河道網の位置関係を直接扱う方法（「流路追跡法」と呼ぶことにする）がある。地形図を用いる場合は、ディジタル化と呼ばれる座標入力装置にそれを貼り、地形図上の河道に沿ってその位置座標と主要点の標高値をコンピュータに入力していく。後述するように、比較的狭小な流域であればパソコンで処理できる。広い流域では容量の関係で大型計算機を利用しなければならないがデータ数が増えるためデータ入力に多大な労力を要する。この種のデータベースとして既に国土数値情報の流路位置データファイルが整備されている。これを大型計算機で処理する。

本報告では、前記したメッシュ法と流路追跡法をパソコン及び大型計算機（国土数値情報を利用）上でそれぞれ実行するシステムを提示し、その実行上の問題点を明らかにする。手法・計算機・国土数値情報（標高データファイル：KS-110-1、流路位置ファイル：KS-272）の各々の種別により、ここで扱うシステムはTable 1に示すA1, A2, B1, B2, B3の5種類である。システムB3は複数の国土数値情報を併せ用いたものであり、流路追跡法を組み込むことによりメッシュ法を拡張したものと考えてよい。

本報告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.でパソコンによる水文地形解析システムを提示し、そのシステムにより得られた解析結果を示し、さらにこのシステムの問題点を検討する。4.で国土数値情報の基本的性格について述べる。5.で国土数値情報を大型計算機で処理するシステムを提示し、その問題点を検討する。6.は結語である。

Table 1. Automatic data processing systems A1, A2, B1, B2 and B3

Computer	Mesh method	Ordinary analysis of channel network
Personal computer	A1	A2
General purpose computer	B1 (KS-110-1)	B2 (KS-272)
(Digital National Land Information)	B3 (KS-110-1, KS-272)	

2. 河道網系の地形則

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 $N_u = R_b^{k-u}$
- [2] 河道長則 $\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_l^{u-1}$
- [3] 集水面積則 $\bar{A}_u = \bar{A}_1 R_a^{u-1}$
- [4] 河道勾配則 $\bar{S}_u = \bar{S}_1 R_s^{1-u}$

ここに、 N_u は位数 u の河道数、 \bar{L}_u 、 \bar{A}_u および \bar{S}_u はそれぞれ位数 u の河道の平均的な長さ、集水面積および勾配を表す。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。

$R_b = N_u / N_{u+1}$ 、 $R_l = \bar{L}_{u+1} / \bar{L}_u$ 、 $R_a = \bar{A}_{u+1} / \bar{A}_u$ 、 $R_s = \bar{S}_u / \bar{S}_{u+1}$ 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。

石原・高棹・瀬能 (1969) は、出水解析への応用を念頭において、河道網の形成過程のランダム性を考慮することによって、複雑な河道網の分布状況に内在するさらに詳しい普遍的な法則性を確率論的に見出そうとし、以下の統計則を得ている⁷⁾。

[5] 1/4 則 (分岐比の期待値) 位数 u の河道数 N_u が十分大きい場合、 $N_u = (1/4)^{u-1} N_1$ となることが期待される。これは、前述の河道数則の理論的裏付けとなるものである。

[6] 1/2 則 (合流点数分布の期待値) 一流域において N_u 個ある位数 u の河道のうち位数 $u-1$ の河道がつくる合流点を何個持つものがどのような割合で分布しているか理論的に考察すると、位数 u の河道数が十分大きい場合、 $N(i, C_u) / N_u = (1/2)^i$ なる関係が期待される。ここに $N(i, C_u)$ は位数 $u-1$ の河道がつくる合流点を i 個もつ位数 u の河道 C_u の個数である。

[7] 3/4 則 (河道配分数分布の期待値) 位数 u の河道が位数 $u+1$ 以上の河道にどのような割合で分布されるかという河道配分数の分布を理論的に考察すれば、次のような関係が期待される。すなわち、位数 u の河道 N_u 個のうち、位数 v ($v = u+1, u+2, \dots, k$; k は最大位数) の河道に流入するものの個数を ${}_v N_u$ とするとき、 N_u が十分大きければ、

$${}_v N_u / N_u = \begin{cases} 3/4 & (\text{for } v = u+1) \\ (1/2)^{v-u+1} & (\text{for } v = u+2, u+3, \dots) \end{cases}$$

となる。これは上記文献⁷⁾で提示された 3/4 則を修正したものである (京都大学水文・水資源研究会での友杉 (旧姓瀬能) との議論による (1987 年 12 月))。

本研究では、上記 [1] ~ [7] について解析した結果を示す。

3. パソコンによる自動水文地形解析システム

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。例えば、Lawrence (1986)⁸⁾ は標高データを用いて流域の分割を行うなど、流域の空間的構造を把握するための手法を提案している。

このような背景のもとに、ここではパソコンを利用した 2 つの方法による水文地形解析を行う。すなわち、メッシュ法 (A1) および流路追跡法 (A2) である。1. で既に述べた通り、メッシュ法とはメッシュ交点 (あるいはメッシュ区画内) の情報を処理する方法であり、流路追跡法とは流路位置に関する

データを直接に扱い、地形解析を行う方法である。本章では、水文地形解析システム A1 および A2 の概要を示す。

3.1 パソコンを用いたメッシュ法による水文地形解析システム (A1) の概要

水文地形解析システム (A1) の手順は以下の通りである。

① 地形図上で、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読み取り、パソコンに入力する。(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。)

② この標高データを用いて、流域に降る雨滴をメッシュ交点間の最急勾配方向に追跡する。追跡する方向は Fig. 1 に示すように 8 方向である。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とその点までの集水面積をあらわす。

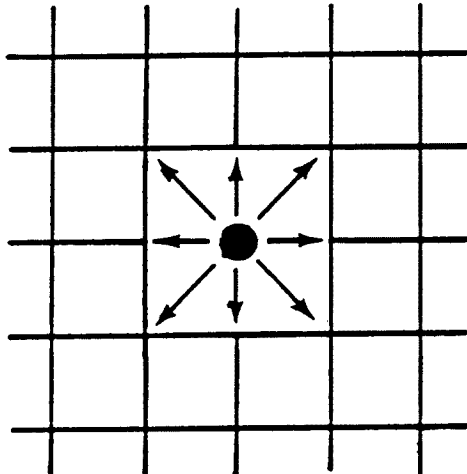


Fig. 1. Direction of tracking the mesh-based stream line (basically, the stream line is tracked in the steepest direction).

(メッシュの一辺の長さ)² × (通過頻度) = 集水面積
この追跡のためのプログラムは野上 (1986)⁹ によって提示されているが、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¹⁰。Fig. 2 は、こうして得られた落水線図 (由良川大野ダム上流域) である。(流域出口は図左下方; Fig. 4 参照)

③ 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の水系図が得られる。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

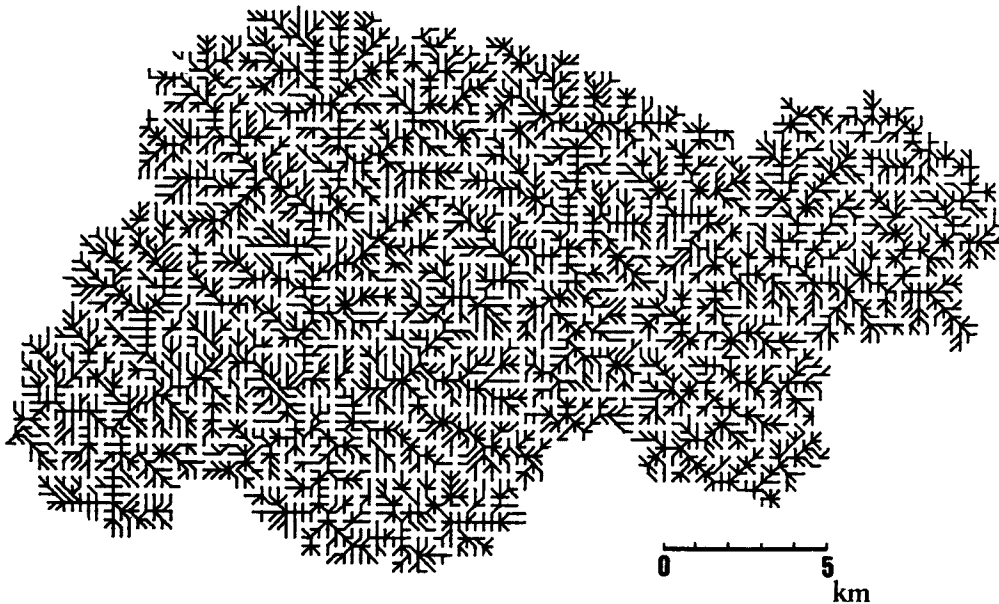


Fig. 2. Mesh-based stream-line network.

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みなせるので、これを擬河道網と呼ぶ。(Fig. 3)

- ④ 擬河道網に位数のナンバリングを自動的に行う。
- ⑤ 位数毎の擬河道の数、長さ、面積、勾配を算定する。
- ⑥ 分岐比、河道長比、集水面積比、河道勾配比などを算定する。
- ⑦ $N(C_n)$, N_n をカウントする。

3.2 デジタイザを用いた流路追跡法による水文地形解析システム (A2) の概要

水文地形解析システム (A2) の手順を以下に示す。

- ① 対象とする流域の地形図上で、青線で記されている河道の合流点、下流端、上流端の標高値を読み取る。
- ② 地形図をデジタイザに貼り、河道部分をデジタイザの読み取り装置 (十字カーソルあるいはスタイラスペン) で追跡しながら水流の位置座標、TAG 番号 (合流点、上・下流端、中間点を区別する)、標高値をコンピュータに入力し、水系データファイルを作成する。流域が広く、1 枚の地形図内に収まらない場合は、地形図を貼りあわせて、デジタイザに収まる大きさまで縮小するなどの作業がある。

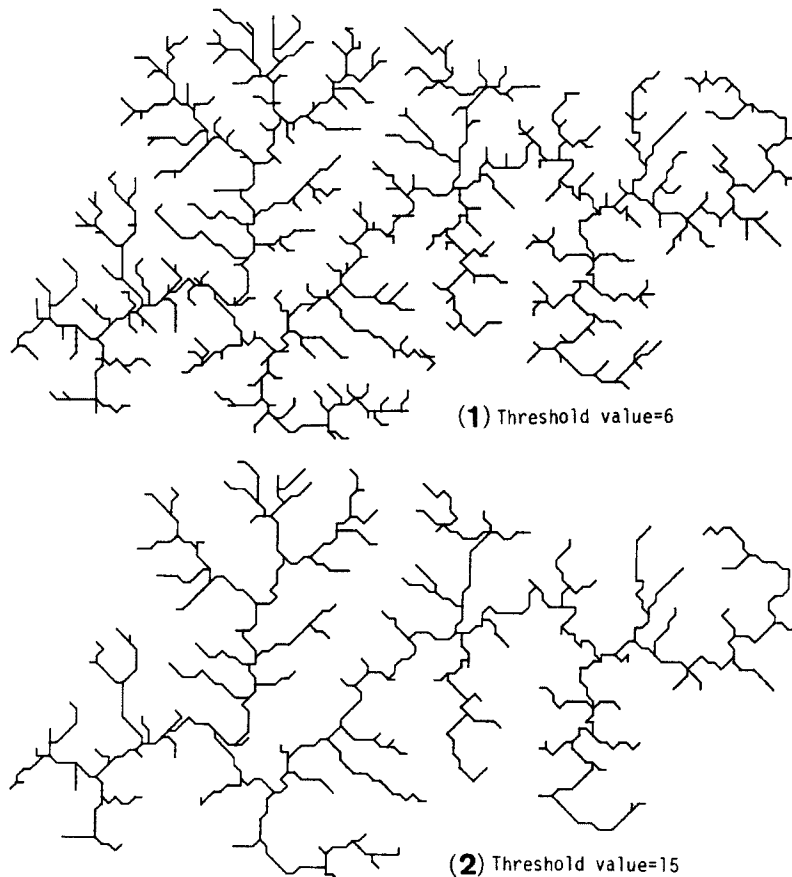


Fig. 3. Quasi-stream network. ((1) Threshold value=6 ; (2) Threshold value=15)

- ③ この水系データファイルにより、河道網に位数のナンバリングを自動的に行う。
- ④ 位数毎の河道数、河道長、河道勾配を算定する。
- ⑤ 分岐比、河道長比、河道勾配比を算定する。
- ⑥ $N(C_w)$, N_w をカウントする。

3.3 実流域への適用例——解析スケールと地形特性量の関係——

水文地形の解析を行う際、対象とする現象生起の時間スケール・空間スケールが問題になる。ここでは、地形解析の空間スケールに注目し、地形特性量が一次河道（位数1の河道）認定の精粗によりどのように変化するか調べてみる。

水系を上流に遡る際にどこ迄を河道とみなすかは地形図の縮尺に依存する。高山 (1972)¹¹⁾ は、3千分の1、1万分の1の都市計画平面図と2万5千分の1、5万分の1の地形図を用いて、面積10数km²の流域でこれに関する検討を行っている。また、島野・鈴木 (1981)¹²⁾ は、2万5千分の1の地形図を用いて、5～100km²の面積を持つ8流域で同様の検討を行った。その結果、分岐比などの特性量は縮尺の影響をあまり受けないようであるとしている。

Fig. 2, 3は、システムA1の由良川大野ダム上流域（約350km²）への適用例である。メッシュ間隔は250mで、約9千個の交点の標高値をデータとして扱っている。また、Fig. 4は5万分の1の地形図上の河道網を由良川大野ダム上流域に関してトレースしたものである。

本報告で提示するシステムA1では3.1で定義したしきい値により、一次河道の認定方法を連続的に変えることができる。すなわち、しきい値を徐々に大きくしていくことは、細かな刻みで地形図の縮尺を小さくしていく（粗い水系図を得る）ことに相当するので、地形特性量の変化の様子がより詳細に見られることになる。

Fig. 5は、地形特性量（(1)分岐比、(2)河道長比、(3)集水面積比、(4)河道勾配比；これらの量を求めるのは、算術平均、幾何平均、回帰分析などの方法があるが、以下で示す結果はすべて算術平均によっている。また、最大位数の擬河道はその算定には含めなかった。）としきい値の関係を示している。しきい値を大きくしていくと、ある時点で最大位数の値 k が $k-1$ に変わる。図中、○, △, +は、擬河道網の最大位数 k の値が順に5, 4, 3であることを示す。しきい値を小さな値から徐々に大きくしていくと、各特性量は初めは位数1の擬河道数の減少に伴って、徐々に減少していき、位数の大きな擬河道の数・長さなどに変化がある時点でジャンプする。そして再び遞減し、またジャンプする。このこ

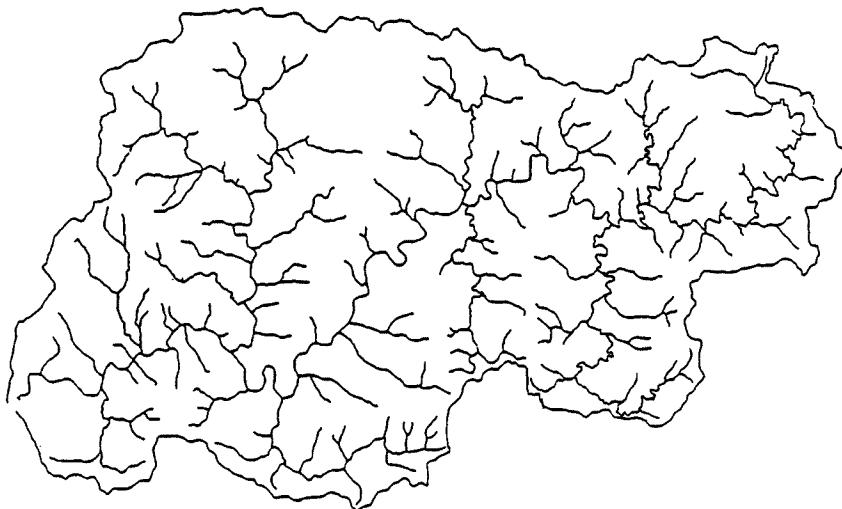


Fig. 4. Actual stream network based on the topographical map of 1/50000.

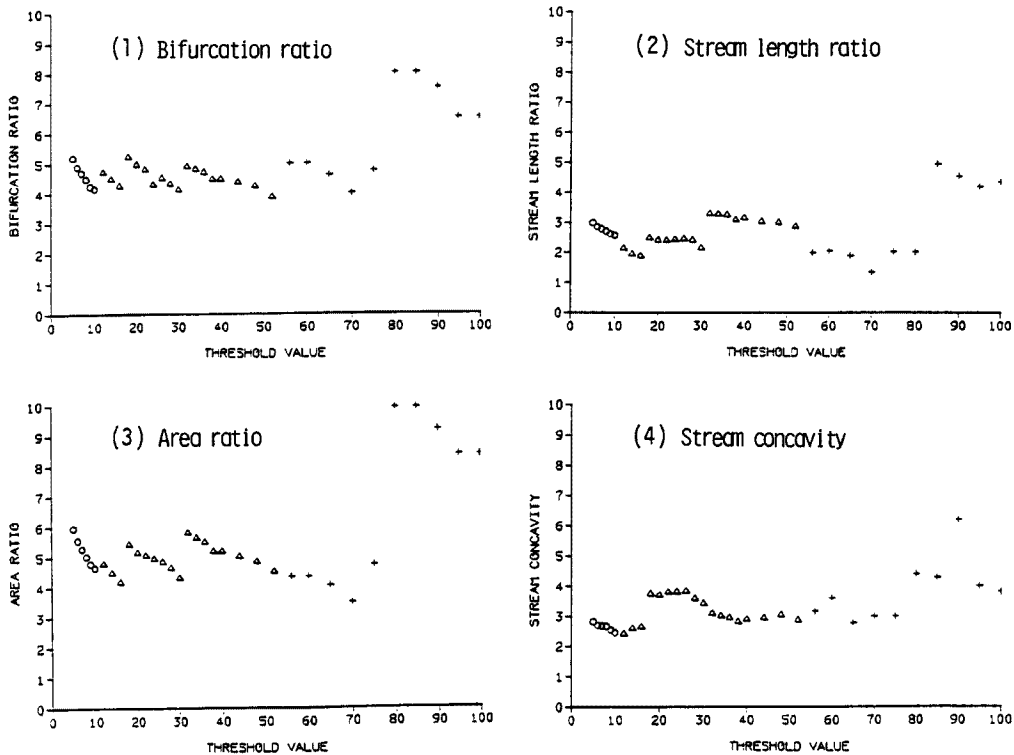


Fig. 5. Relationships between the threshold values and the topographical characteristic values, R_b , R_l , R_a and R_s .

ぎり状に変化する関係は、高木・Rohde (1978) が示した地下水流出の逓減特性と流域面積の関係¹³⁾にも見られる。これらは、現象のスケールあるいは解析のスケールを検討する上で一つの有用な情報を与えるものである。

結局、Fig. 5 から言えることは、分岐比などの地形特性量は地図の縮尺によって変動するというものである。ある特定の流域について見たこうした変動については、例えば分岐比について河道網の発達過程の検討において指摘されている^{14), 15)}。もちろん、トポロジカリー・ランダム過程のもとでの前記の統計則や河道網パターンの生起確率構造¹⁶⁾は、空間スケールの大小にかかわらず成立するものである。

次に、しきい値と3つの統計則との関係について調べる。Fig. 6 は N_2 と N_1 および N_3 と N_2 の関係を示したものである。しきい値の変化による位数1～3の擬河道の数の変化を併せて見ることができる。プロットされた点は、1/4則の理論値 ($N_u = (1/4) N_{u-1}$ の直線) を若干下回っており、これは分岐比 R_b が4～5程度の値をとった Fig. 5 (1) の結果と一致する。Fig. 7 は、 $u=2$ の場合のしきい値6, 9, 15 について、1/2則の適合性を見たものである。擬河道数の多いしきい値6のときは理論値に良く適合することがわかる。Table 2 は、3/4則の適合性を見たものである。位数1の擬河道が位数4 (= $u+3$) の河道網に流入する割合が大ききようである。Fig. 3 を詳しく見ると、位数4の擬河道に多数の位数1の擬河道が流入している。ここで提示した擬河道の定義によれば河道配分数分布についてはこのような性向(地形図上に河道が記されていないようなところにも短い擬河道ができ、特に距離の長い擬河道にそうした低次の擬河道の流入する割合が若干高くなる)があるようである。

次に、2つのシステム A1, A2 による解析結果を比較してみる。Table 3 は、由良川大野ダム上流域の実河道網をシステム A2 で解析した場合の河道数、平均河道長、平均河道勾配とそれに基づく分岐比、河道長比、河道勾配比(擬河道網の解析と同じように最大位数の河道はこれらの特性量の算定には含めなかった。)を示した。なお、実河道としては5万分の1の地形図に青線で記されている河道部分のみを取

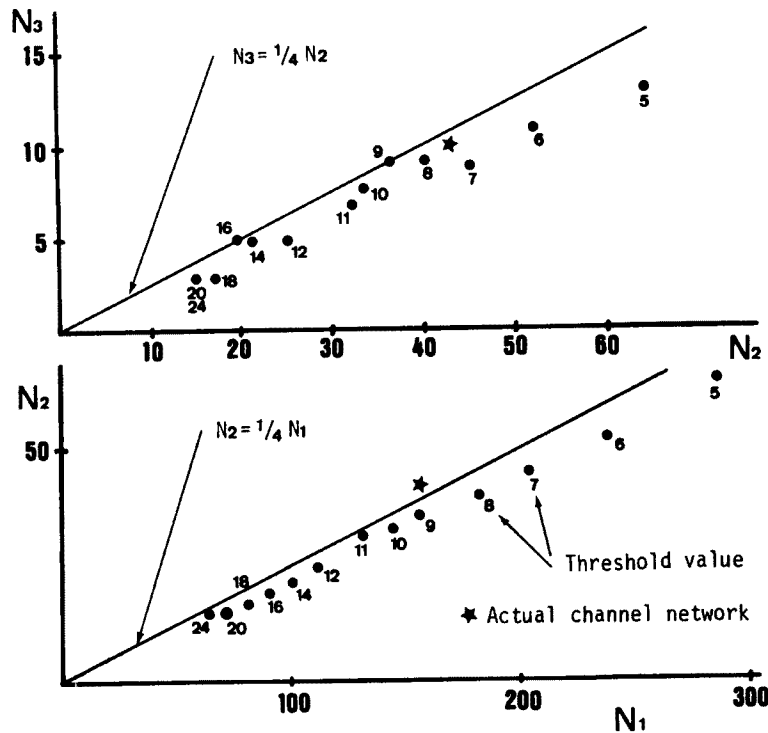


Fig. 6. Relationships between N_j and N_{j+1} ($j=1, 2$).

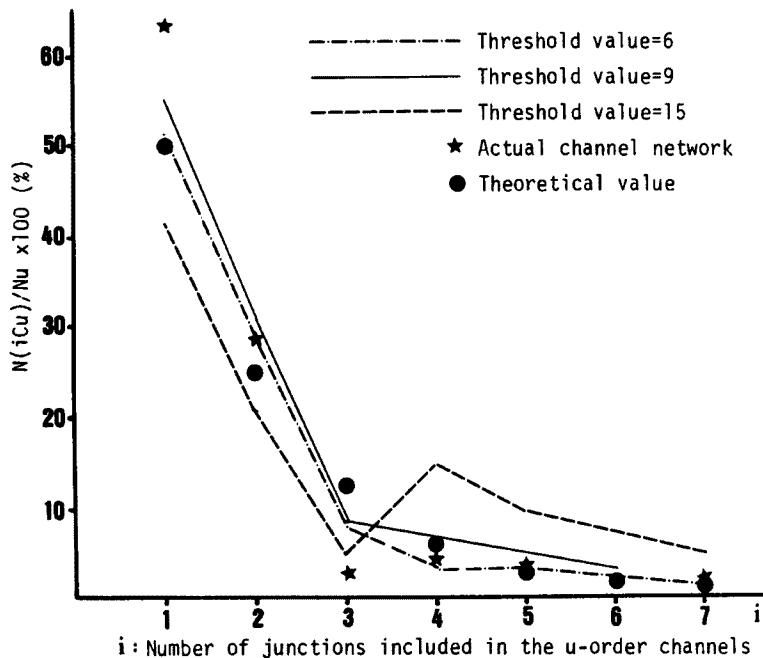


Fig. 7. Relationships between $N(iCu)/N_u$ and i .

り扱い、一次河道をさらに上流へ延長するなどの操作は行わなかった。ディジタイザ入力用の図面作成と入力に要した時間は延べ数時間程度であった。

Table 3より実河道の分岐比、河道長比はそれぞれ4.32、2.65で、最大位数は5であるから、Fig. 5 (1) および (2) と対照してみると、しきい値9の擬河道網が実河道に近い結果を与えていると言える。河道勾配比については擬河道網解析は若干小さい値を与えるようである (Fig. 5 (4) との比較から)。また、Fig. 6, 7と Table 2には実河道網入力の結果が示されているが、この実河道網は3つの統計則に概ね適合していると言える。しきい値9の擬河道網が実河道の良い近似を与えることがこれらの結果からも確認できる。

3.4 パソコンによる水文地形解析の問題点

メッシュ法 A 1 の問題点を①②に、流路追跡法 A 2 の問題点を③④⑤に記す。

- ① まず、デジタルマップの作成に大変時間がかかるということが挙げられる。ここでは由良川大野ダム上流域 (約 350 km²) を覆う 5 万分の 1 の地形図を 6 枚合成して、それに 250 m メッシュをかけ、約 9 千個の交点の標高値を読み取りデジタルマップを作成した。同一人が毎日 5 時間作業をするとして、読み取りとデータ入力のために数日要する。
- ② パソコンの BASIC 言語の

Table 2. Verification of the 3/4 law

u	1			2		
v	u+1	u+2	u+3	u+1	u+2	u+3
Theoretical value	.750	.125	.063	.750	.125	.063
Threshold value =6	.647	.181	.122	.750	.173	.077
Threshold value =9	.622	.153	.108	.722	.250	.027
Threshold value =15	.705	.095	.200	.684	.316	.000
Actual channel network	.713	.146	.064	.767	.233	.000

容量の問題がある。メッシュ間隔を 250 m に設定したのはパソコン（NEC の PC-9801 VM 2 に RAM ディスクを装置したもの）の容量を最大限利用するためである。メッシュ間隔は細かい方が望ましいが、流域面積がさらに大きくなるとパソコンの BASIC では容易に処理できない。500 m メッシュの解析をも試みたが、落水線が大きな分水界を飛び越す例が頻繁に生じ、粗すぎるということがわかった。前記した SHE モデルの適用例とも考え合わせると、250 m 程度以下のメッシュサイズが適当なようである。

- ③ 標高値の読み取り、河道の位置座標入力に時間を要する。メッシュ法の標高読み取り作業に比べると、取り扱うデータ数はかなり少ないが、上述の流域ではデータファイルの作成に 1 人で数時間かかる。
- ④ 大きな流域を扱う場合、地形図を合成したり、あるいはディジタイザに収まる大きさに縮小してやるなどの作業が必要となる。
- ⑤ 各河道の集水面積を求めるのが煩雑である。集水面積を求めるには、分水界をディジタイザから入力するか、または、入力した実河道から分水界を推定する手順が必要になる。今回、集水面積は算定していない。

Table 3. Results of analysis for the actual channel network obtained by System A 2

U	N _u	\bar{L}_u (m)	\bar{S}_u
1	157	1136	.13802
2	43	1816	.04830
3	10	5520	.01519
4	2	18274	.00451
5	1	11303	.00088
	R _b = 4.317	R _l = 2.650	R _s = 3.136

4. 国土数値情報の概要¹⁷⁾

ここでは、4.1 で国土数値情報の基本的性格についてふれ、4.2, 4.3 では、国土数値情報を利用する上で重要となるメッシュシステムおよび座標の正規化について説明する。

4.1 基本的性格

地理的情報のディジタル化、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ィジタル情報ではあるが、地図と位置的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。従来、各研究者が大変な労力を費やして、地形図などを細分化し小区域内の情報を読み取っていたが、国土数値情報によって比較的容易にディジタル情報として入手することが可能になった。国土数値情報は、国土地理院が一定

の規準の基に全国的にこの種の情報を整備・体系化したもので、通常磁気テープに収録されており、計算機によって大量のデータを迅速に処理、加工することができる。この点が、従来の国土に関する情報類と大きく異なっている。また、国土数値情報の情報単位は、基本的には次節で述べる標準地域メッシュに基づいており、これも国土数値情報の特色の一つと言える。

4.2 国土数値情報における位置表示方法

国土数値情報では位置を表示する方法としては、原則として経緯線によって区画する「標準地域メッシュ・システム」を採用している。

標準地域メッシュには、①20万分の1地勢図の大きさに相当する1次メッシュ、②2万5千分の1地形図の大きさに相当する2次メッシュ、および③2次メッシュを縦横10等分した3次メッシュがある。1次メッシュは、経度差1度、緯度差40分で区画された範囲のもので、日本の中央付近では縦横とも約80kmである。2次メッシュは、1次メッシュを縦横8等分したもので、その範囲は、経度差7分30秒、緯度差5分にしてあり、大きさは、約10km×10kmである。3次メッシュは、経度差45秒、緯度差30秒の範囲にあり、大きさは約1km×1kmである。

標高データファイルには、3次メッシュをさらに縦横4等分したメッシュ交点の標高データが収められており、流路位置ファイルおよび流域界・非集水界線位置ファイルには、2次メッシュにおける正規化座標（後述）がデータとして収められている。

4.3 座標の正規化について

流路位置ファイルおよび流域界・非集水界線位置ファイルに収められている情報は、ディジタイザによってその位置が計測されている。ところが、この計測値は各図葉毎にばらばらの座標系をもっているため、そのままではその加工処理などが面倒である。そこで地図の伸縮補正を兼ねて、各々の位置を経緯度を基準にした一定座標系の座標に変換すると便利である。これを位置の正規化と呼んでいる。

具体的には、任意の点Pに対し、Pを通り、上辺と下辺を同じ比 ξ : $1-\xi$ ($0 \leq \xi \leq 1$)に、また左辺と右辺を同じ比 η : $1-\eta$ ($0 \leq \eta \leq 1$)に切る線分がそれぞれ唯一つ決まるが、そのときの (ξ, η) をPの正規化座標としている (Fig. 8)。

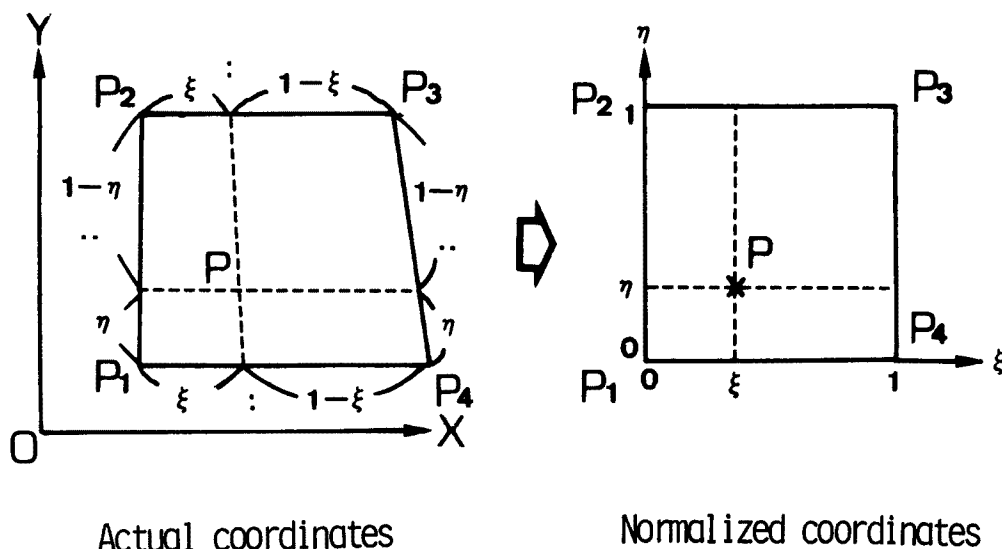


Fig. 8. Normalized coordinates.

5. 国土数値情報を用いた水文地形解析システム

既に述べたように、パソコンを用いた解析では容量及び作業時間の問題がある。一方、手作業で作成したデータファイル（システム A1, A2 で利用）と同様のものが、国土数値情報のデータファイルに整備されている。そこで、大型計算機で国土数値情報を利用することにより、3. で提示した水文地形解析システムをさらに充実させることが可能である。なお、ここで利用する国土数値情報のファイルは3種類であり、各ファイルの内容を以下に簡単に記す。

(1) 標高データファイル (KS-110-1)

各3次メッシュを縦横4等分する方眼（約250 m間隔）の格子点での標高値。

(2) 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コード、河床標高値等の情報。

(3) 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。

5.1 標高データファイルを用いた水文地形解析システム (B1)

標高データファイルには、3次メッシュをさらに縦横4等分する方眼（約250 m間隔）の格子点の標高データが収められている。3次メッシュ単位で収められているこの標高データを並べかえて、3.1 で用いたデジタルマップをもとに、落水線の追跡、擬河道網の確定、および種々の地形特性量の自動算定を行なう。なお、メッシュ交点が実河道上にある場合、標高データには9999 mと記録されている。データ処理の際、この標高データを周囲8交点の標高値のうちで最低標高の値と一致させる。こうしたのち落水線の追跡から地形特性量の自動算定に至る手順は、3.1 で述べたものと同一の手法を用いた。このシステムの特徴を以下に示す。

- ① 日本全国の任意の流域に対し、2次メッシュ1個（ 10×10 km）、4個（ 20×20 km）、9個（ 30×30 km）分の範囲でデジタルマップを自動作成する。
- ② 演算処理能力の高いFORTRAN言語でプログラムを作成し、全過程を大型計算機で処理する。
データを並べかえ、落水線網（Fig. 9）を追跡する作業に、京大大型計算機センターのFACOM M-780でCPUtimeが約10分かかる（メッシュをかける範囲が 20×20 kmの大きさの場合）。また、擬河道網（Fig. 10）の作成および地形特性量の算定を行なうために必要なCPUtimeは数秒程度である。

5.2 流路位置ファイルを用いた流路追跡法による水文地形解析システム (B2)

国土数値情報の流路位置ファイルを用いた方法は、国土数値情報を取り扱えるようにシステムの一部を変えた他は、3.2 に記したシステム A2 と基本的に同じである。手を加えた内容は以下の通りである。

- ① システム A2 を FORTRAN 言語に移植し、大型計算機を利用する。
- ② 流路位置は2次メッシュ毎に、そのメッシュ内の正規化座標で表されている。複数の2次メッシュにまたがる流路を繋ぎ、全体を1つの水系として扱える必要がある。流路位置データを上流端から下流端の方向へ並べ変え、各メッシュの図郭上で繋ぐなど、データの並びを変更し、A2 で扱った水系データファイルと同様のデータファイルを作成する。
- ③ かなり広い流域（面積千～数千km²）を扱う際には、流路位置ファイルでは緯度の違いによる距離の補正を行なう必要がある。広い流域では、ほぼその中央にあたる2次メッシュでの距離をその流域全体に適用した。

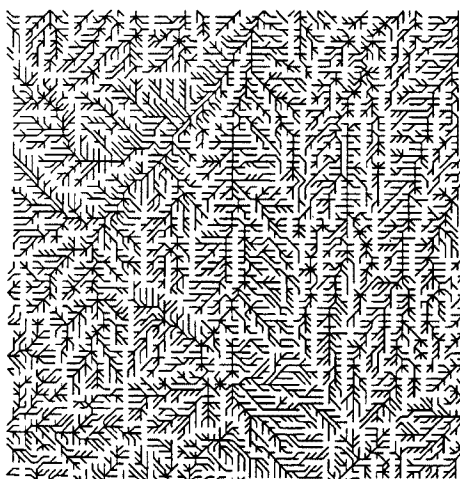


Fig. 9. Mesh-based stream-line network based on the file KS-110-1 (Mesh code= 533864, 65, 74, 75).

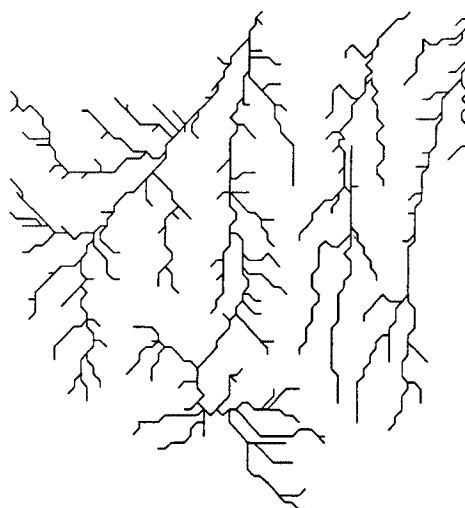


Fig. 10. Quasi-stream network based on the file KS-110-1 (Mesh code= 533864, 65, 74, 75 ; Threshold value= 9).

5.3 水文地形解析システム B1, B2 の問題点

システム B1 の問題点を示す。

- ① 落水線の追跡を行なうと、Fig. 11 のようにループを形成することがあり、これ以降の落水線の追跡は不可能である。これは、B1 のプログラムに関する問題でもあるが、標高データのみを用いる本システムでは、十分な改善は不可能である。
- ② 擬河道網を作成すると、Fig. 12 の○印を施した部分のように河道が交差するケースが生じる。このような擬河道が形成されると、地形特性量の解析結果の精度は著しく損なわれる。

Table 4 は、システム B2 により、一級河川を含む水系に関して、分岐比、河道長比を算定した一例である。このシステム B2 には次のような問題点がある。

分岐比の値は、一般に言われている 4 前後の値をとるが、河道勾配比は一般に言われている 2~3 よりもかなり大きな値をとる。これは以下のことに要因があると考えられる。Fig. 13 は流路位置ファイルに

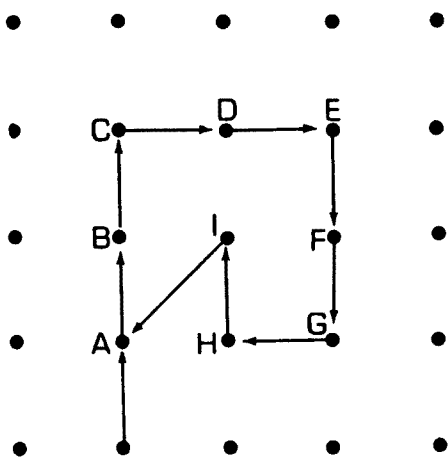


Fig. 11. Mesh-based stream lines forming a loop.

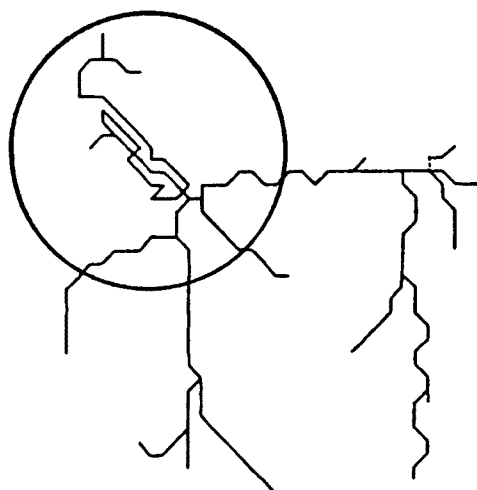


Fig. 12. Example of a crossing quasi-stream network.

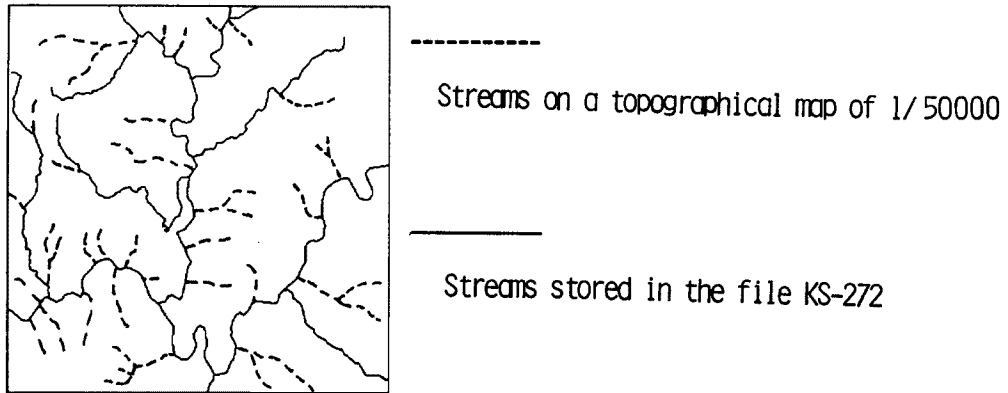


Fig. 13. Streams on a topographical map of 1 / 50000 and streams stored in the file KS-272 (Mesh code= 523574).

収められている流路位置データ（実線）と5万分の1の地形図上に記されている水系（実線と点線）を図示したものである。このように、流路位置ファイルは流域内の主要な河道を扱ったものであり、多くの細流は省略されている。その結果、1次河道数が少なくなり最大位数は小さくなる。また、流路位置データファイルは2万5千分の1の地形図から主な河道のみの位置座標と標高値を評価してファイル化したものであるから、細流の省かれた粗い水系を扱っているにもかかわらず、河道は最上流の分水界近くまで記録されており、最上流の河道勾配が相対的に大きく評価されることになる。こうしたことから、河道勾配比は大きな値をとるのである。

5.4 3種類のデータファイルを併用した水文地形解析システム (B3)

システム B1 では、実河道網を良く近似した擬河道網を得ることが困難な場合があり、また、システム B2 では、流路位置ファイルで一次河道がまびかれていることにより、粗い河道網に対する解析しか行えない。このように、1個のデータファイルを取り扱うシステム B1、B2 ではそれぞれに問題があり、十分な解析は不可能である。そこで、標高データファイルの他に流路位置ファイルおよび流域界・非集水界線位置ファイルをも扱えるようにメッシュ法を拡張したシステム B3 を考える。このシステムの手順を示す。

- ① 流域界線位置データの正規化座標を最近傍のメッシュ交点に置換し、流域外を除外する。この過程は本質的ではないが、③以後の計算時間をかなり短縮できる。
- ② 流路位置ファイルから流路位置データを読み取り、正規化座標を近傍のメッシュ交点に置換する (Fig. 14)。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。Fig. 14 のデータを参照しながら落

Table 4. Example of the results obtained by System B2

Drainge basin	R _b	R ₁	R _s
Tokoro River	4.31	1.92	8.48
Mabuchi River	4.32	1.54	2.78
Natori River	4.70	2.00	3.51
Aka River	4.50	1.49	4.45
Kano River	4.25	1.31	2.97
Maruyama River	3.29	1.07	5.07
Yura River	3.94	1.60	4.28
Simanto River	4.86	1.99	6.54
Sigenobu River	3.59	1.03	5.95
Hino River	3.40	0.98	3.23
Sendai River	3.32	1.33	8.02
Tenjin River	3.40	0.98	3.23
Yamakuni River	4.15	2.25	2.93
Matuura River	3.58	2.03	7.67
Rokkaku River	3.58	2.13	7.43
Honmyou River	4.33	0.62	8.30
Banjyou River	3.46	2.08	7.99

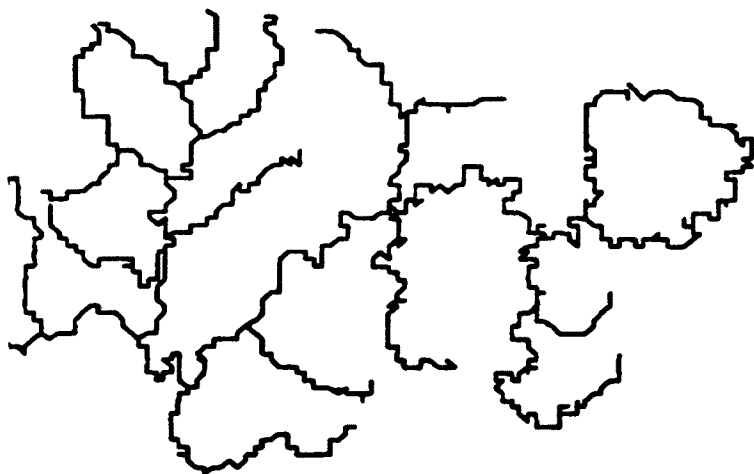


Fig. 14. Mesh-based stream-line network obtained from the stream network in the file KS-272.

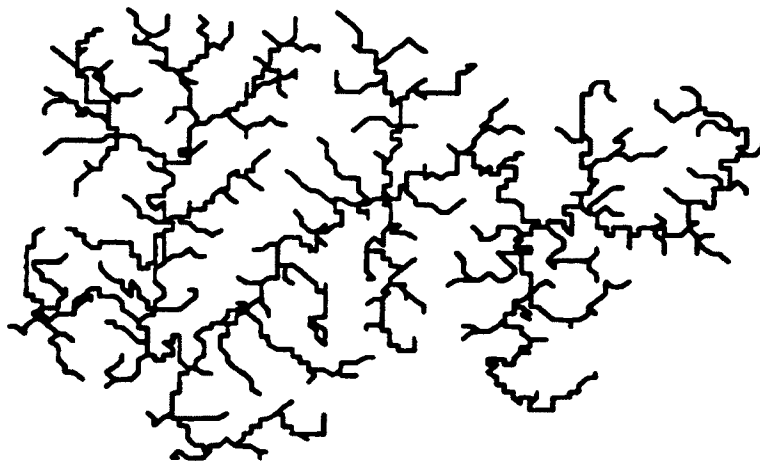


Fig. 15. Quasi-stream network obtained by referring to the mesh-based stream-line network given in Fig. 14.

6. 結 語

通例煩雑な作業を必要とする水文地形解析の自動化を試み、解析の省力化・客観化を図った。本研究で構築したシステムは次の①～⑤の5種類である。

- ① パソコンを利用したメッシュ法によるシステム A 1
- ② パソコンを利用した流路追跡法によるシステム A 2
- ③ 標高データファイル (KS-110-1) を利用できるように A 1 を拡張したシステム B 1
- ④ 流路位置データファイル (KS-272) を利用できるように A 2 を拡張したシステム B 2
- ⑤ KS-110-1 と KS-272 を利用できるように B 1 を拡張したシステム B 3

各システムの利害得失を示す。①②はともに地形図を原資料として手作業によりデータを抽出するため、①ではデジタルマップの作成に、②では水系データファイルの作成に多大な労力を要する。また、パソコンの容量が小さく、いずれも対象とする流域の大きさが限定される。③④は①②をそれぞれ拡張したものであり、大型計算機を利用することで容量の問題を、国土数値情報を利用することでデータファイル作

水線を追跡すると 5.3 の①の問題点が解消できる。

③ 標高データを利用して、落水線を追跡する。このとき、Fig. 14 (流路位置ファイル) では存在しなかった細流が河道網に含まれてくることになり、システム B 2 では不可能であった細流の評価が可能になる。

④ 以下、3.1 の③から⑦に至る手順に準ずる。こうして得られた擬河道網を Fig. 15 に示す。

結局このシステムは、流路位置ファイルを用いることで擬河道網の実河道網に対する近似度を高めるとともに、あらゆる流域での落水線の追跡を可能にし、メッシュ法を踏襲することで多くの細流を評価できるようにした。すなわちシステム B 1, B 2 による場合の問題点の大半は改善されている。ただ、現時点では、細流部において擬河道網が交差する場合があります、まだ十分とはいえない。現在この問題について検討中であるが、プログラムの若干の改良により解消することが可能であると考えている。

成の煩雑さを解消している。ただし、取り扱う国土数値情報の性質により、③ではメッシュ間隔は約 250 m に限定され、④では細流を含めた河道網の解析が行えないなどの制約がある。一方、①ではデータ数が容量に収まる範囲内でメッシュ間隔を自由に設定でき、②では大縮尺の地形図に記された河道を忠実に解析することができる。また、①および③は標高データのみで流域地形を評価するため、流域によっては落水線を追跡するのは不可能な場合があることが分かった。さらに、擬河道網が交差することもある。

⑤は上述した③④の欠点を補うものである。ほとんどの流域に対して落水線が追跡でき、細流の評価も可能である。もちろん、①②の容量の問題や、作業の煩雑さの問題は解消している。ただ、①③に見られる擬河道網の交差の問題は解消するには至っていない。現在この問題について検討中であるが、プログラムの若干の改良により解決できると考えている。⑤が完成すれば、日本全国の任意の流域（湖沼などの存在する流域を除く）において、河道網の地形解析が行えることになる。

ここでは、Horton-Strahler の位数理論に基づく解析結果を考察したが、例えば、マグニチュード理論に基づく解析¹⁰⁾なども、若干のシステムの拡張により可能である。今後、⑤（システム B3）の改良とともに、これまでに得られてきた理論的・経験的な地形則に関する検証、新たな法則の発見、さらには、これら諸法則の出水解析への応用に努めていきたい。

参考文献

- 1) 市川 新：新しい雨水流出モデル—メッシュ法—の提案，京大防災研年報，第 29 号 B-2，1986，pp. 233-244.
- 2) 川谷 健・中野啓真・菊田勝之：地表流出解析モデルへの地形要素の導入に関する研究，第 32 回水理講演会論文集，1988，pp. 31-36.
- 3) 嶋田啓一・山田 正・藤田睦博・洪 廷芳：流域の地形特性が降雨流出に及ぼす影響について，第 32 回水理講演会論文集，1988，pp. 43-48.
- 4) Abbott, M. B. et al.: An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, "SHE", J. Hydrology, 87, 1986, pp. 45-77.
- 5) Bathurst, J. C.: Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique Européen, J. Hydrology, 87, 1986, pp. 79-102.
- 6) 高山茂美：河川地形，共立出版，1974，pp. 22-74.
- 7) 石原藤次郎・高棹琢馬・瀬能邦雄：河道配列の統計則に関する基礎的研究，京大防災研年報，第 12 号 B，1969，pp. 345-365.
- 8) Lawrence, E. B.: Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models, Water Resour. Res., Vol. 22, No. 1, 1986, pp. 15-24.
- 9) 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.
- 10) 溝淵伸一：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.
- 11) 高山茂美：地形図の縮尺が水流の次数区分に及ぼす影響について，地理学評論，第 45 巻第 2 号，1972，pp. 112-119.
- 12) 島野安雄・鈴木裕一：水系特性に及ぼす地形図の縮尺の影響について，地理学評論，第 54 巻第 12 号，1981，pp. 698-706.
- 13) 高木不折・F. G. Rohde：地下水流出の流域における特性変化と場所的スケール，土木学会論文集，第 270 号，1978，pp. 99-108.
- 14) Coffman, D. M. et al.: New topologic relationship as an indicator of drainage network evolution, Water Resour. Res., Vol. 8, No. 6, 1972, pp. 1497-1505.
- 15) 徳永英二：河川の分岐と流域構成について，数理科学，No. 221，1981，pp. 45-50.

- 16) 藤田睦博：流域地形構造とその統計則に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 234 号，1975，pp. 73 - 82.
- 17) 建設省国土地理院，国土庁調整局：国土数值情報，大蔵省印刷局，1987.
- 18) 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.