

水文地形解析の自動化の試み

Automatic Data Processing of Geomorphologic Features of Drainage Basins and Channel Networks

京都大学工学部 宝 肇 K. Takara

京都大学工学部 高棹琢馬 T. Takasao

京都大学大学院 溝渕伸一 S. Mizobuchi

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)の研究に始まり、その後多くの研究者によって多数の成果を挙げてきた。ところで、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われてきたが、(1)地形図の縮尺が2万5千分の1、5万分の1などに限定されていること、(2)一次河道(河道網上流端)の認定方法が確定していないこと、(3)作業が非常に煩雑であること、などの難点があった。一方、近年、国土数値情報に見られるように地形データが整備されつつあり、さらには、計算機の発達によりこうしたデータの処理が迅速にできるようになってきたことなどから、従来の解析法の改革が可能になりつつある。

本研究は、こうした背景のもとに、水文地形解析の自動化を試み、これまでに得られてきた経験的・理論的な地形則の検証、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を究極の目的としている。ここでは、その第一歩として、近年急速に普及しているパソコンを利用した解析例を示す。

2. 河道網系の地形則

Horton が提案し Strahler が改良した河道位数(Horton-Strahler位数)の概念を基礎として、経験的に得られた4つの地形則を次に示す。これらに関連する多数の研究については、高山の著書¹⁾に詳しい。

- | | | |
|----------|-----------------------------------|---|
| 【1】河道数則 | $N_u = R_b^{k-u}$ | $R_b = N_u / N_{u+1}$ (分岐比) |
| 【2】河道長則 | $\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_L^{u-1}$ | $R_L = \bar{L}_{u+1} / \bar{L}_u$ (河道長比) |
| 【3】集水面積則 | $\bar{A}_u = \bar{A}_1 R_a^{u-1}$ | $R_a = \bar{A}_{u+1} / \bar{A}_u$ (集水面積比) |
| 【4】河道勾配則 | $\bar{S}_u = \bar{S}_1 R_s^{1-u}$ | $R_s = \bar{S}_u / \bar{S}_{u+1}$ (河道勾配比) |

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わし、 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。

石原・高棹・瀬能(1969)は、出水解析への応用を念頭に置いて、河道網のトポロジーモデルを想定し、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²⁾。

【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も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 N_u が十分大きい場合、 $N(iC_u) / N_u = (1/2)^i$ なる関係が期待される。ここに $N(iC_u)$ 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配分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個数を N_v とすると、 N_u が十分大きければ、 $N_v / N_u = 3/4 (1/4)^{v-u-1}$ となる。

本研究では、以上の基本的な地形則に関する検討を行なう。

3. メッシュ交点の標高データを利用した水文地形解析

地形解析を行なう場合に、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としたものであり、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)³⁾は都市域の、川谷・菊田・中野(1987)⁴⁾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ている。また、Abbotら(1986)のSHEモデル（欧州水文システムモデル）⁵⁾も流域のメッシュ分割を行なっており、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⁶⁾。

ここでは、地形図上に直交する等間隔のメッシュ交点の標高データを用いて、流域の地形特性量（分岐比・河道長比・集水面積比・河道勾配比など）を自動算定するプログラムを作成し、解析スケールとこれらの地形特性量の関連を明らかにする。

3.1 方法 自動算定の手順は以下のようである（図1）。

①対象とする流域の地形図上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（図2）。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。区域内のすべ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表す。この追跡のためのプログラムは野上(1986)によって提示されている⁷⁾が、若干の問題点があるので改良を加えた⁸⁾。図3は、こうして得た落水線図である。

③落水線図は、実際の河道網とはかなり異なり、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設けて、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現したものとみなせるので、これを擬河道と呼び、このネットワークを擬河道網と呼ぶことにする（図4）。

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 $N(iC_u)$ 、 N_u をカウントする。

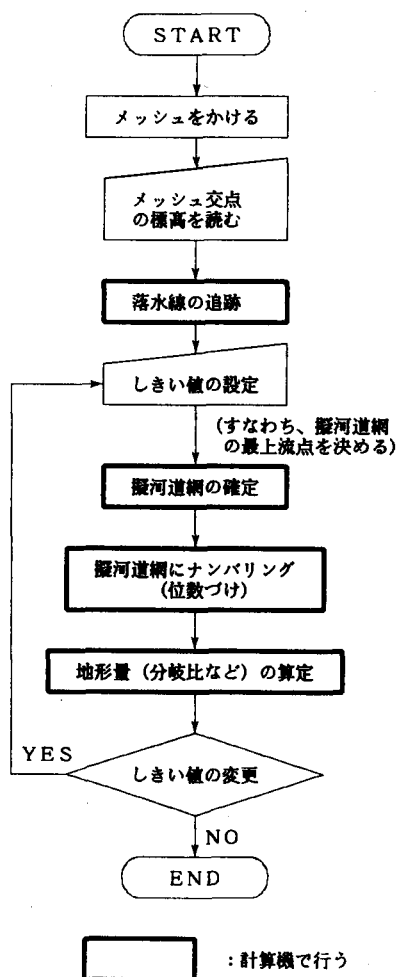


図1 自動算定の手順

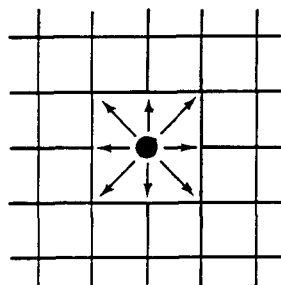


図2 雨滴の追跡方向

3.2 実流域への適用 図3と図4は、由良川大野ダム上流域(350km²)への適用例である。5万分の1の地形図を6枚合成して、それに250mメッシュをかけ、約9千個の交点の標高を手作業で読み取りデジタルマップを作成した。同一人が毎日5時間作業するとして、読み取りとデータ入力のために数日要する。メッシュ間隔を250mに設定したのはパソコンのBASIC言語の容量を最大限利用するためである。メッシュは細かい方が望ましいが、デジタルマップ作成の労力が大変である。また250

mメッシュでも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。500m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、粗すぎるのがわかった。上のSHEモデルの適用例とも考え合わせると、250m程度以下のメッシュサイズが適当なようである。

3.3 解析スケールと地形特性量との関連

水文システムの解析を行なう際、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となる。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よう。

水系を上流に遡る際にどこまでを河道とみなすかは用いた地形図の縮尺に依存する。高山(1972)⁹⁾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)¹⁰⁾は、2万5千分の1、5万分の1の地形図を用いて、5~100km²の面積をもつ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。

本研究では、3.1③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ゆくことは、細かなきざみで地形図の縮尺を小さくしてゆく(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。

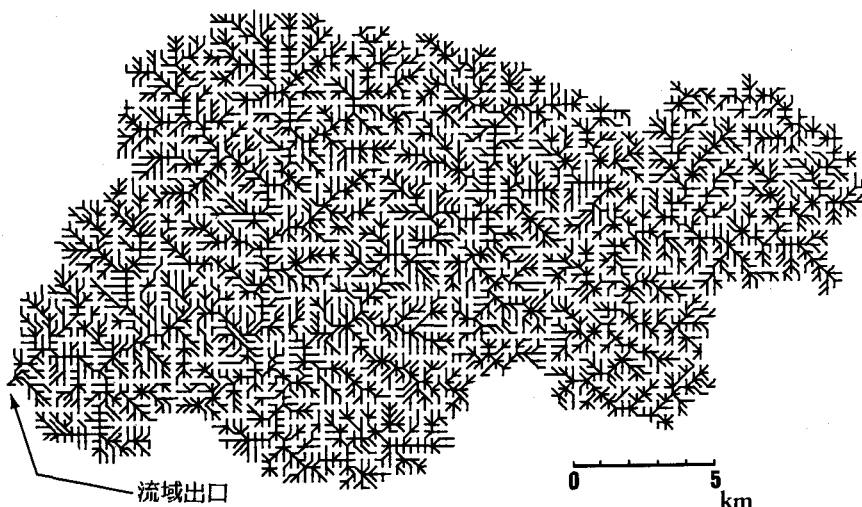


図3 落水線図

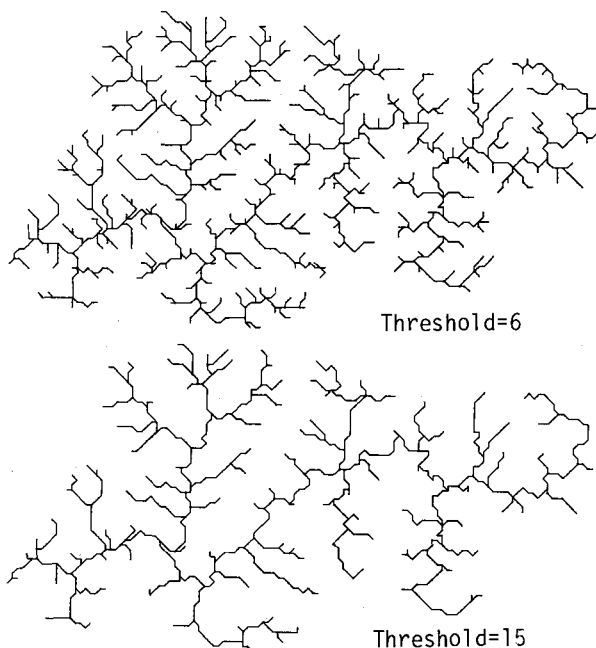


図4 擬河道網

図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には、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ゆくと、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ゆくと、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逡減してゆき、位数の大きな擬河道の数・長さなどに变化がある時点でジャンプする。そして再び逡減し、またジャンプする。このノコギリ状に変化する関係は、高木・Rohde(1978)が示した地下水流出の逡減特性と流域面積の関係¹¹⁾ 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。

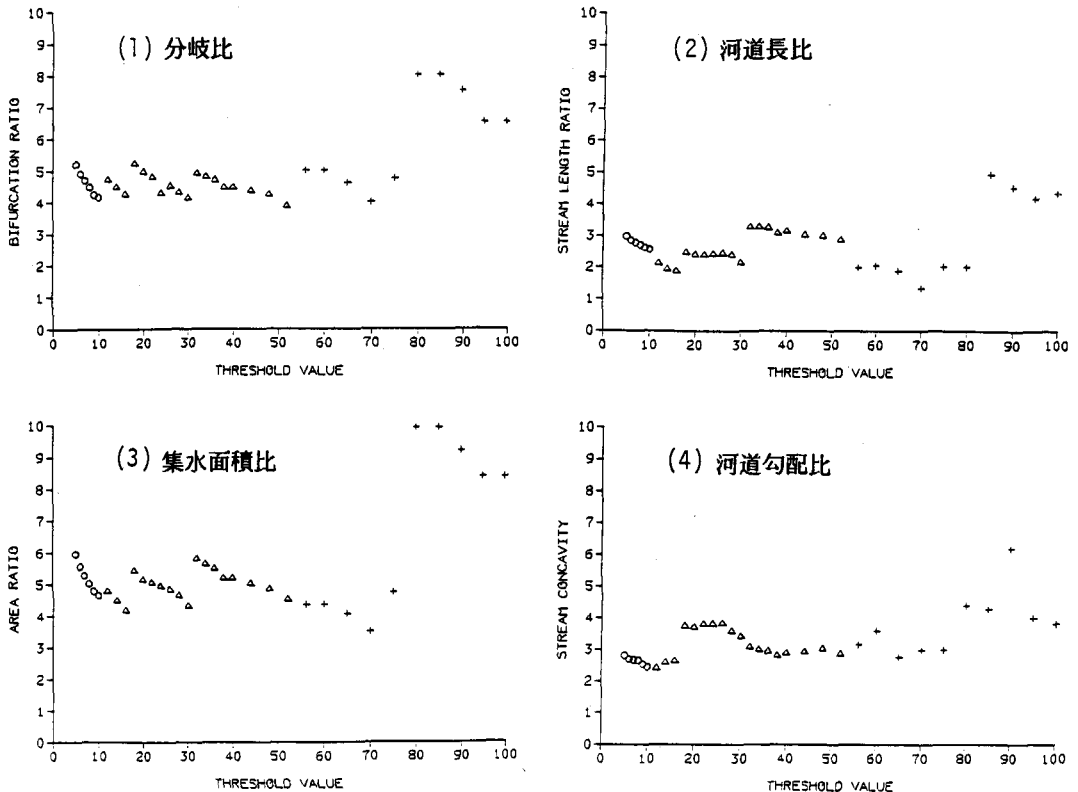


図5 しきい値と地形特性量の関係

結局、図5から言えることは、分岐比等の地形特性量は地図の縮尺によって変動するということである。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^{12), 13)}。もちろん、トボロジカリー・ランダム の仮定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¹⁴⁾ 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。図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 程度の値をとった図5(1)の結果と一致する。図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 のときは理論値によく適合することがわかる。表1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

擬河道に流入する割合が大きいようである。図4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があるようである。 $u=2$ の場合、理論値によく適合している。

3. 4 実河道網入力の場合との比較

河道網系の解析を計算機を使って行なう場合、これまで述べてきたような標高のデジタルマップを入力とする方法よりも正統的な方法として、河道網の位置関係を地形図から直接入力する方法がある。すなわち、ディジタイザと呼ばれる座標入力装置に地形図を貼り、地形図上の河道に沿ってその位置座標と主要点の標高を入力してゆくのである。この方法の難点は、大きな地形図を貼るには大きなディジタイザが必要となることである。地形図を何枚も合成しなければならないような広い流域の解析には、元の河道網形状を保存した状態で地形図をディジタイザに収まる大きさまで縮小してやる必要がある。また、各河道の集水面積を求めるのが煩雑である（分水界をディジタイザから入力するか、または、入力した実河道網から分水界を推定する手順が必要となる）。本節では、標高のデジタルマップ入力による擬河道網解析の結果と、こうした実河道網入力による解析結果とを比較してみる。

表2には、由良川大野ダム上流域の実河道網を入力した場合の河道数、平均河道長、平均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なわなかった。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。

表2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、図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（図5(4)との比較から）。また、図6、図7と表1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。

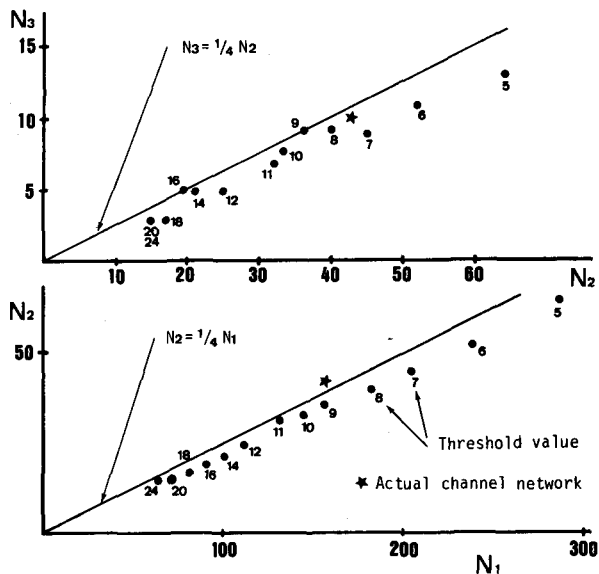


図6 1/4則の検証

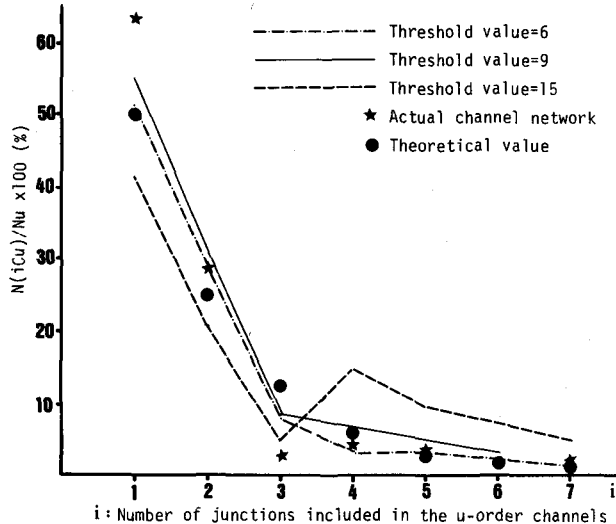


図7 1/2則の検証

4. おわりに

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。前述のように地形データの入力にはかなりの時間を要する。地形図から直接データを読み取ってくれるような高性能の光学的読み取り装置が開発されれば、真に自動化がなされることになるが、まだしばらく時日を要しそうである。当面は、ここで取り扱ったような手法が一つの方向となるであろう。本研究の内容は極めて基本的なものである。しかしながら、例えばマグニチュード理論に基づく解析¹⁵⁾なども若干のプログラムの拡張により可能となる。地形あるいは水系に関するデータベースとしては国土地理院により国土数値情報が整備されている。このデータを大型計算機で自動処理するシステムを現在開発中であり、別の機会に成果を発表したいと考えている。

参考文献

- 1) 高山茂美：河川地形，共立出版，22-74，1974。
- 2) 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，京大防研年報，12B，345-365，1969。
- 3) 市川 新：新しい雨水流出モデル—メッシュ法—の提案，京大防研年報，29B-2，233-244，1986。
- 4) 川谷 健・菊田勝之・中野啓真：流出解析への地形特性の導入に関する一考察，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，II-54，1987。
- 5) Abbott, M.B. et al.: An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, "SHE", J. Hydrology, 87, 45-77, 1986。
- 6) Bathurst, J.C.: Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Système Hydrologique Européen, J. Hydrology, 87, 79-102, 1986。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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，地理評，45(2)，112-119，1972。
- 10) 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，地理評，54(12)，698-706，1981。
- 11) 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，土論集，270，99-108，1978。
- 12) Coffman, D.M. et al.: New topologic relationship as an indicator of drainage network evolution, Water Resour. Res., 8(6), 1497-1505, 1972。
- 13) 徳永英二：河川の分岐と流域構成について，数理科学，221，45-50，1981。
- 14) 藤田睦博：流域地形構造とその統計則に関する基本的研究，土論集，234，73-82，1975。
- 15) 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，土論集，273，35-48，1978。

表1 3/4則の検証

U	V 理論値	U+1 .750	U+2 .188	U+3 .047
1	しきい値6	.647	.181	.122
	しきい値9	.622	.153	.108
	しきい値15	.705	.095	.200
	実河道網	.713	.146	.064
2	しきい値6	.750	.173	.077
	しきい値9	.722	.250	.027
	しきい値15	.684	.316	.000
	実河道網	.767	.233	.000

表2 実河道網の諸量

U	N _u	L _u (m)	S _u
1	157	1136	.13802
2	43	1816	.04830
3	10	5520	.01519
4	2	18274	.00451
5	1	11303	.00088
	(分岐比)	(河道長比)	(河道勾配比)
	4.317	2.650	3.136