

II-7 河道位数解析に基づく流域構成地形量間の関係について

北見工業大学工学部 正会員 内島 邦秀

1. まえがき

河川流域の複雑な地形特性を定量的に把握する研究は、Horton¹⁾が河道位数によって河道網を区分する方式を考え、そして河道数、河道長、河道勾配という地形量に関する経験的法則を提案したことに始まる。その後位数化のHorton方式はStrahlerによって改良され、それが簡潔であり主観的判断も介入しないということと共にHortonの提案した経験的地形法則も成り立つということで、一般に広く用いられるようになった。さらに集水面積についてもSchummによって法則化され²⁾、一般にHortonの4つの地形法則と呼ばれる河道数則、河道長則、河道勾配則、集水面積則が確立されている。筆者はこの2、3年来、「流域地形要素と水文諸量との相関性」という主題をもってHorton及びStrahlerの位数化方式によって北海道東部4河川、常呂川³⁾、湧別川、渚滑川、網走川の河口までの全流域に対して河道位数解析に基づく地形解析を行ない、主に実証的立場から流域地形特性を追求してきた。流域地形特性を定量的に表現することは流出現象を解明するための重要事項であり、本研究はその第1段階としての基礎資料を得るべく、流域構成地形量として河道長、河道勾配、集水面積、流域平均勾配をとりあげ、それらの相互関係について得られた結果を報告するものである。なお、網走川は途中で湖に流入するので、これを除いた上記3河川流域を対象とした。

2. 地形量の計測法と算出法

計測には国土地理院発行の縮尺5万分1地形図を使用し、水源については地形図上に記されている河道の最上流端とした。河道長及び集水面積の計測にはそれぞれギルヒメーター、プラニメーターを使用し、3回測定してその平均値を計測値とした。位数化された河道区分の河道勾配は等高線より読み取った上流端と下流端の高度差をその河道長で割って求めたが、位数に対する平均河道勾配は平均高度差を平均河道長で割って求めた。流域平均勾配は交点法によって算出した。なお、同縮尺の地形図を用い、水源の定義及び最大位数も上記3河川流域と同じである由良川⁴⁾、福知山⁴⁾上流域、四国土佐湾に注ぐ3河川流域(渡川、仁淀川、物部川)⁵⁾のStrahler方式による地形量データを使用させていただいた。

3. 河道位数解析の概説

Hortonの地形法則は、位数 u の河道数 N_u 、平均河道長 $\bar{L}_u$ 、平均河道勾配 $\bar{S}_u$ 、平均集水面積 $\bar{A}_u$ を一括して $\bar{y}_u$ で表わすと、一般に、 $\log_e \bar{y}_u = a + b u \dots \dots (1)$ で表示でき、 a, b を回帰分析より求めるとすれば、⁶⁾

$$a = \frac{2 \sum_{u=1}^k (2k+1-3u) \log_e \bar{y}_u}{k(k-1)}, \quad b = \frac{-6 \sum_{u=1}^k (k+1-2u) \log_e \bar{y}_u}{k(k^2-1)} \dots \dots (2)$$

であり、(2)式において k は最大位数である。さらに、分岐比、河道長比、河道勾配比、集水面積比と呼ばれる地形特性値も一括して R とすれば、 $R = \exp |b| \dots \dots (3)$ である。さて、2つの地形量の各位数に対する平均値を $\bar{y}_{1u}, \bar{y}_{2u}$ とおき、(1)式を満足するものとして、

$$\log_e \bar{y}_{1u} = a_1 + b_1 u \dots \dots (4), \quad \log_e \bar{y}_{2u} = a_2 + b_2 u \dots \dots (5)$$

で表わして、(4)式と(5)式とにより u を消去すれば、 $\bar{y}_{1u} = \alpha \bar{y}_{2u}^\beta \dots \dots (6)$ ただし、

$$\alpha = \exp \left(a_1 - \frac{a_2 b_1}{b_2} \right), \quad \beta = \frac{b_1}{b_2} \dots \dots (7)$$

となる。また、(4)式、(5)式より、

$$\log_e \frac{\bar{y}_{1u}}{\bar{y}_{2u}} = (a_1 - a_2) + (b_1 - b_2)u \quad \dots (8)$$

も得られる。しにがって、(6)式、(8)式に基づいて2地形量間の関係を求めることができる。以下に、計測数値データをもとにして流域構成地形量間の関係について述べることにする。

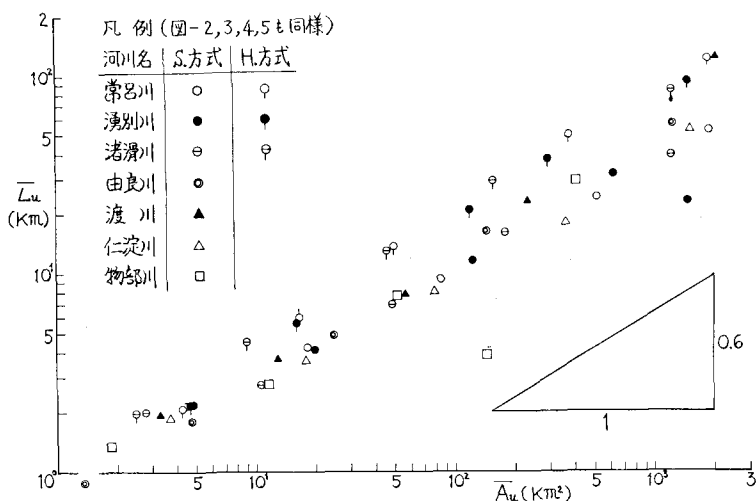


図-1 河道長と集水面積との関係

4. 河道長と集水面積との関係

この関係はHackの法則として有名であり、河道長 L と集水面積 A とは $L = \alpha A^\beta$ で関係づけられている。計測データを(6)式に基づいてプロットしたのが図-1であり、 $\beta = 0.6$ となり、Hackの法則を満足している。Horton方式の方がStrahler方式よりもばらつきが少なく、またHorton方式による各位数の河道の上流端は水源であって、かつその流域の本川長と見なせられるから、図-1の結果はHackの法則と比較できる。 α の値は水源の定義の仕方によって違ってくることは当然であり、Hackは河道を分水界まで延長した本川長を用いている。Strahler方式によっても $\beta = 0.6$ となることを島野の北海道19河川及びYangの米国の14河川のデータをもとに考察してみると、それらの河道長比 R_L と集水面積比 R_A の平均値はそれぞれ $R_L = 2.365, 2.179$ 、 $R_A = 4.535, 3.861$ であり、(3)式及び(7)式より、 $\beta = \log_e R_L / \log_e R_A = 0.569, 0.576$ となる。

つぎに、Horton方式による河道長と集水面積とを使って算出される流域特性値を(8)式に基づいて図示したのが図-2である。 $\bar{A}_u / \bar{L}_u$ は流域平均幅であり、一方 $\bar{A}_u / \bar{L}_u^2$ は形状係数である。図から明らかなように両特性値とも位数間の変化率はほぼ一定であり、平均幅は位数が大きくなるに従って大きくなるが、形状係数は逆に小さくなって行くことがわかる。即ち、水源に近い流域ほどその形状は方形に近づく傾向を示している。

そこで、さらに1河川全流域の全集水面積に対する各位数の総集水面積の占める割合及び全河道長に対する各位数の総河道長の占める割合を示したのが図-3である。図中に記入した $\bar{A}_{0u}$ はStrahler方式における位数 u のinterbasin area (位数2以上の河道に、雨水が他の河道を通過しないで、直接流入する地域)の面積の平

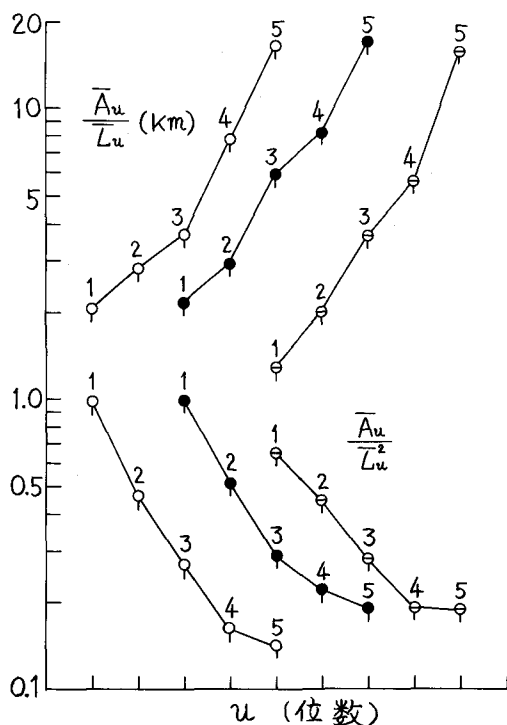


図-2 平均幅と形状係数

均値を表わす。位数1から右下がりの実線は各位数の総河道長 ($N_u \bar{L}_u$) を表わし、右上がりの実線はそれらを累積したものであり、位数5のそれは全河道長 ($\sum_{u=1}^5 N_u \bar{L}_u$) を示す。また、位数1から右下がりの破線は各位数の河道に付帯する集水面積の総計 (位数1については $N_1 \bar{A}_1$, 位数2以上は $N_u \bar{A}_{ou}$) を表わし、右上がりの破線はそれらを累積したものであり、位数5のそれは全集水面積 ($N_1 \bar{A}_1 + \sum_{u=2}^5 N_u \bar{A}_{ou}$) を示す。図-3より、単位集水面積当りの河道長として定義される河川密度は、常呂川、湧別川で約0.50、渚滑川で約0.72と読み取れるが、それとは無関係に、3河川とも位数1の総集水面積及び総河道長は全体の50~60%を占めていることがわかる。位数2までを考えると実に70~80%を占めることになる。そして、3河川の本川長に相当するHorton方式の位数5の河道長は全体の10%前後に位置している。しにがって、図-2の形状係数の変化と後述する河道勾配及び流域平均勾配についても位数の小さな流域ほどそれらは相対的に大きな値になるということを合わせて考えた場合、流出解析や治水計画において上記の事実を十分考慮しなければならないと考える。

5. 河道勾配と集水面積との関係

この関係はFlint⁹⁾によって経験的に(6)式と同じ形の、 $S = \alpha A^\beta$ で表わされた。この関係式の妥当性について検証したのが図-4である。総体的に $\beta \approx -0.5$ と見なせるが、Horton, Strahlerの両方式のデータともばらつきが大きい。4.と同様に島野による解析データ及びYangによる解析データの河道勾配比 R_s の平均値 $R_s = 2.379, 2.170$ を用いると、同値で $\beta = -0.573$ という結果が得られた。Strahler方式では $\beta < -0.5$ となる傾向が強いように推察できる。

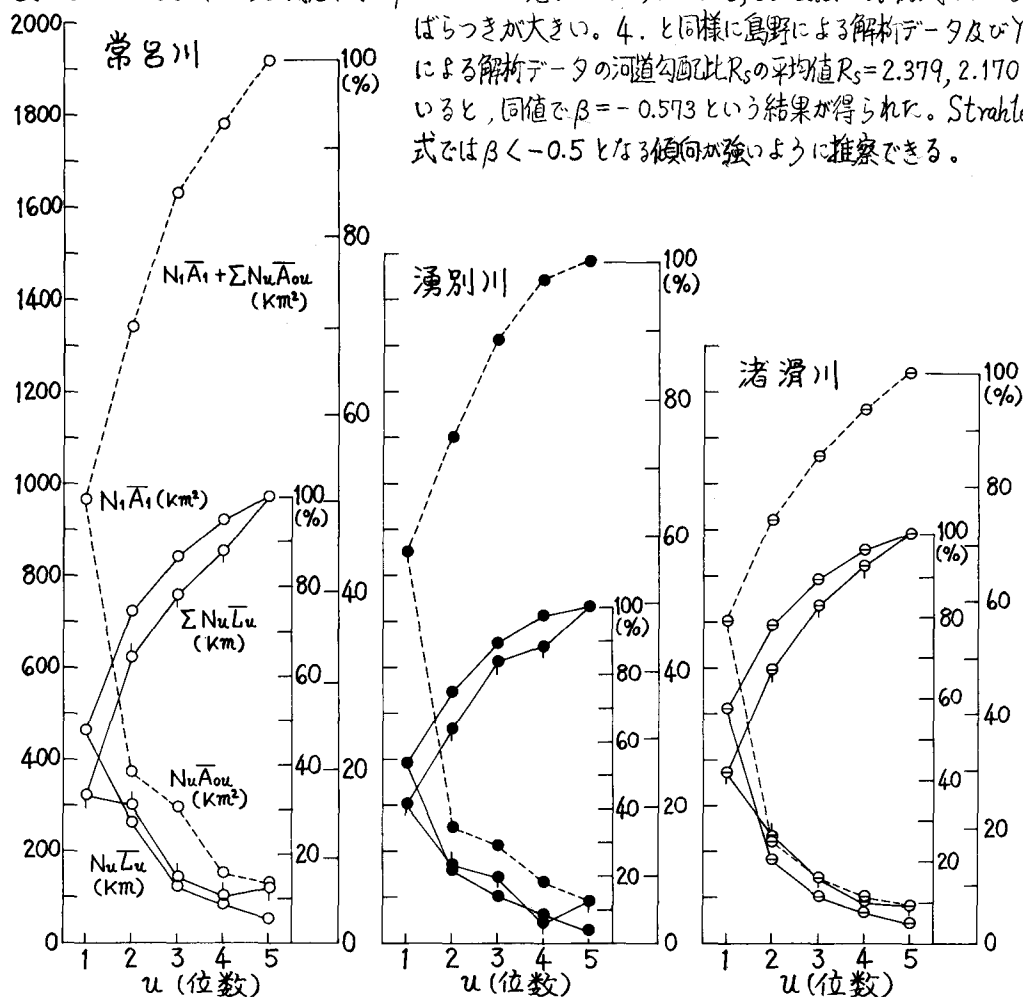


図-3 全流域に対する各位数の集水面積及び河道長の占める割合

6. 流域平均勾配と河道勾配との関係¹²⁾

各位数ごとの流域地表面の平均勾配、即ち、流域平均勾配を交点法（方眼線の交点が丁度河道上に位置する場合に、求めようとする流域平均勾配にどのくらいの影響を与えるかという問題が生ずるがこの影響は無視した。）によって算出し、その位数ごとの平均値 $\bar{S}_{Bu}$ と平均河道勾配 $\bar{S}_u$ との比 $\bar{S}_{Bu}/\bar{S}_u$ を(8)式に基づいて法則性を検討したところ良好な結果を得た。さらに(6)式に基づいて2つの地形量の比 $\bar{S}_{Bu}/\bar{S}_u$ と $\bar{S}_u$ との関係を図示したのが図-5である。解明対象の3河川流域及びHorton, Strahler両方式の位数によって区別されることなく、全体を1つの曲線式(9)式で近似できる。

$$\frac{\bar{S}_{Bu}}{\bar{S}_u} = 0.55 \bar{S}_u^{-0.9} \dots\dots (9)$$

河道上流端が水源となるHorton方式を拡張すれば、(9)式は一般に、

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_B}{S} &= 0.55 S^{-0.9} \\ \text{または、} \\ S_B &= 0.55 S^{0.1} \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

となり得る。また、 S_B, S を度に換算すれば(10)式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_B}{S} &= 21.0 S^{-0.9} \\ \text{または、} \\ S_B &= 21.0 S^{0.1} \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

となる。わが国においては、全河川流域に対する各位数ごとの $\bar{S}_{Bu}$ を算出した解明例はないように思う。

Strahlerは、図-6に示されているように、米国の9河川流域の位数2の平均これに S_B と S (図-6の○印) との関係を図-6で表示した。

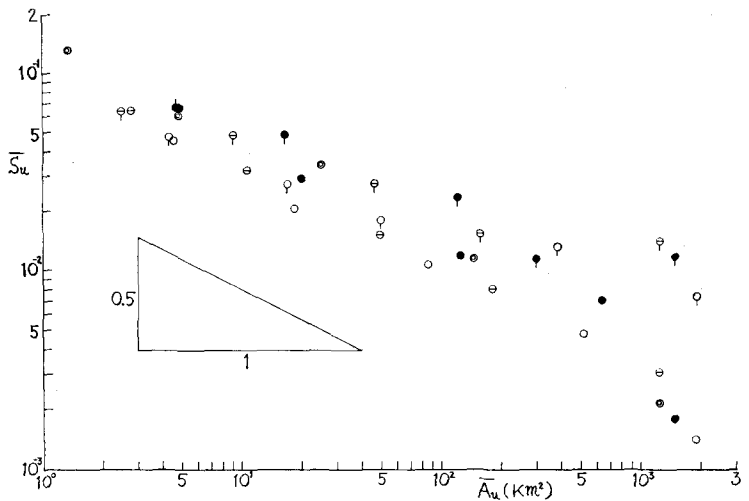


図-4 河道勾配と集水面積との関係

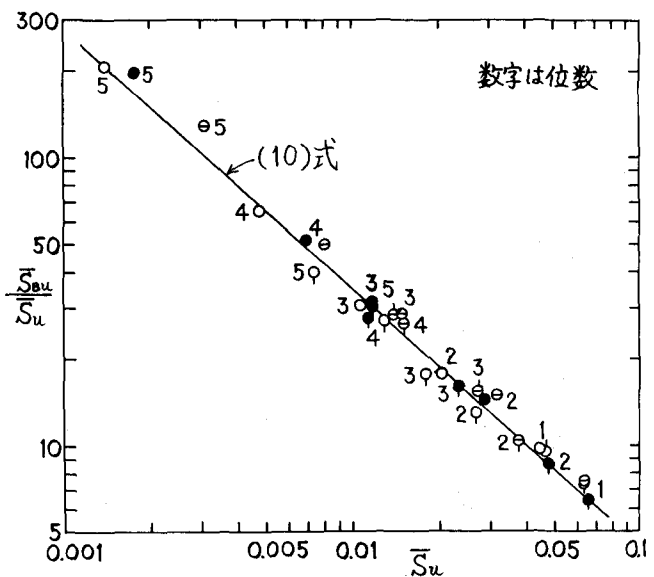


図-5 流域平均勾配と河道勾配との関係

$$\left. \begin{aligned} \log S_B &= 0.60 + 0.8 \log S \\ \text{即ち、} S_B &= 4.0 S^{0.8} \end{aligned} \right\} \dots\dots (12)$$

また、Horton¹¹⁾も最大位数3~5の米国のDelaware川ほか6河川流域の平均の S_B と S を算出している。それらの値を図-6にプロットしたのが●印であり、(12)式に良く適合している。

(10)式あるいは(11)式は常呂川、湧別川、渚滑川の3河川流域に対する地形解明によって得られた経験式であり、日本の河川流域を代表するといえ

ないけれども、米国の河川流域と比較した場合、日本の流域地形は非常に急峻であるといわれる1つの表現と見なして良いであろう。

7. むすび

Horton及びStrahler両方式の河道位数解析に基づいて流域構成地形量としての河道長 L 、河道勾配 S 、集水面積 A 、流域平均勾配 S_B 間の相互関係を計測数値データをもとに追求した結果、つぎのような事項が明らかになった。

- (1) L と A との関係は、Horton, Strahler両方式ともHackの法則が満足された。
- (2) S と A との関係も $S = \alpha A^\beta$ で表現できそうであるが、明確な結果は得られなかった。
- (3) S_B と S との関係は、3河川流域ではHorton, Strahler方式による差異はなく、式(10)あるいは(11)のように経験式として表現できた。
- (4) 図-3に示されているように、全集水面積及び全河道長に対する位数1の総集水面積及び総河道長の占める割合は50~60%であることが認められた。

今後は以上の基本的成果を基礎として流出特性について理解を深め、検討して行きたいと考えている。最後に地形量の計測、算出の際、当時本学の学生であった宇都宮 靖、浜田 和男の両氏から熱心な協力を得た。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Horton, R.E. : Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology, Geol. Soc. America Bull. 56, 1945.
- 2) 高山 茂美: 河川地形, 共立出版, 1974.
- 3) 内島 邦秀, 佐藤 幸雄: 常呂川の流域及び河道特性について, 土木学会支部論文報告集, 33, 1977.
- 4) 石原藤次郎, 高橋琢馬, 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, 12B, 1969.
- 5) 松田 誠祐: 流域の集水面積分布に関する統計的研究, 農業土木学会論文集, 50, 1974.
- 6) 森口 繁一: 初等数理統計学, 培風館, 1957.
- 7) 2)と同じ。
- 8) Yang, C.T. : Potential energy and stream morphology, W.R.R., 7-2, 1971.
- 9) Flint, J.J. : Stream gradient as a function of order, magnitude and discharge, W. R. R., 10-5, 1974.
- 10) Schumm, S.A. : River morphology, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., 1972.
- 11) 1)と同じ。
- 12) 内島 邦秀, 佐藤 幸雄: 河道勾配と流域平均勾配との関係について, 第33回土木学会年講, 1978.

付 録

湧別川、渚滑川のHorton及びStrahler両方式によって計測、算出しに地形量の数値を付表として掲載しておく。なお、常呂川については参考文献 3)に載せてある。

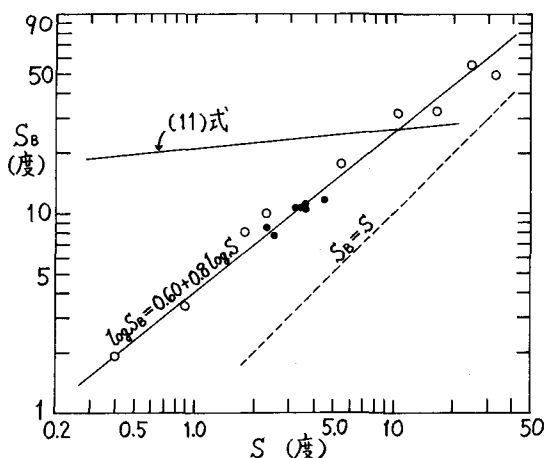


図-6 米国河川流域の S_B と S との関係図

付表

河川名	方式	位数 u	河道数 N_u	河道長 $\bar{L}_u(\text{km})$	河道勾配 S_u	集水面積 $A_u(\text{km}^2)$	流域勾配 S_{Bu}
湧別川	H.方式	1	137	2.20	0.0659	4.74	0.419
		2	29	5.62	0.0482	16.18	0.413
		3	7	20.39	0.0234	119.52	0.374
		4	1	36.85	0.0114	298.19	0.315
		5	1	88.82	0.0116	1495.11	0.353
	S.方式	1	175	2.22	0.0662	4.84	0.424
		2	38	4.11	0.0290	19.95	0.418
		3	9	11.44	0.0119	124.36	0.377
		4	2	30.78	0.00698	632.87	0.362
		5	1	22.57	0.00197	1495.11	0.353
渚滑川	H.方式	1	187	1.96	0.0643	2.50	0.478
		2	50	4.55	0.0481	9.04	0.490
		3	11	12.87	0.0275	46.29	0.427
		4	3	28.62	0.0152	157.31	0.404
		5	1	80.73	0.0140	1232.46	0.400
	S.方式	1	252	2.02	0.0642	2.77	0.481
		2	65	2.74	0.0324	10.59	0.487
		3	15	6.92	0.0151	48.51	0.433
		4	4	15.98	0.00810	180.05	0.404
		5	1	38.65	0.00310	1232.46	0.400