

洪水流出に及ぼす地形効果について

長 尾 正 志

STUDY ON THE GEOMORPHOLOGY OF DRAINAGE BASINS EFFECTING FLOOD RUNOFF

By Masashi NAGAO

Synopsis

The purpose of this paper is to study the general geomorphological characteristics of the upstream drainage basins effecting flood runoff in Japan. The study was done by using the method of order analysis for the stream channels and mountainous slopes of the 16 drainage basins which locate in the upstream of the multi-purpose reservoir at the various districts in Japan. The obtained results are as following :

- (1) As for the composition of the drainage network, the stream numbers show the nearly constant bifurcation ratio for the upstream of 1st and 2nd order within the same climatic district.
- (2) The mean stream lengths show the nearly constant value for the upstream of 1st and 2nd order through whole drainage basins.
- (3) As for the mountainous slopes devided by the stream order number, the mean slope lengths of 1st order seem to take fairy larger value than others and have wide fluctuation. While, those of 2nd and 3rd order seem to take smaller and nearly constant value through whole districts.
- (4) Between the slope length and slope angle, a certain positive correlation is discerned within the same climatic district.

1. は し が き

近年、洪水の流出現象を解明するために、水理学的な手法に基づいて山腹斜面および河道を流下する雨水の運動を追跡して考えていこうとする動きが強く見られる。しかしながら、このような力学的方法を厳密に押し進めていくためには、雨水の運動の場である河川流域の性格が不明であることが解析上の大きな障害になっているように思える。

ところで、洪水流出という面からみれば、河川流域は降雨供給という形で外力が与えられる物理系で、力学的にはその内部で energy などの物理量が保存されるような閉ざされた系ではない。しかも絶え間のない浸食、運搬、堆積などの河水の作用の他に、隆起、陥没などの地殻変動の働きによって時々刻々変化する非定常な系でもある。

しかしながら、永年のこうした外的・内的な作用によって降雨と流域の地形・地質との間にはある種の平衡に近い状態が存在していると考えることができよう。あるいは厳密にはそのような平衡状態に絶えず近づこうとしている過程であるともいえるであろう。そこで、現在の流域の有り方よりこうした時間的に独立な平衡状態とはどういうものであるかを研究することが、現存する流域の性格を把握することに外ならないで

あろう。

こうした意味での洪水流出に及ぼす地形的影響に関する研究は、したがって、とくに浸食性の地盤における河谷の発達という面から開始された。それは流域の状態を数値的に表記するために意味のある地形要素を選択するという方法で米国の Horton¹⁾ によって端緒が開かれた。彼の業績はそれまで単に記述的表現しかとり得なかった地形学を、概括的ではあるが、科学的な計量を通じて力学的な分野に導入した水文学の創始という点で今日でも極めて有意義なものである。その後、彼の仕事は Langbein²⁾ によって継承され、地形状態を表わすために統計的手法が導入された。さらに Smith³⁾, Strahler⁴⁾ などによって、広範囲の実例に準拠して、水理学・地質学・気候学などの理論的裏付けによって理論の展開も一層精細なものとなってきている。

一方、わが国においては、こうした洪水流出からみた地形的な研究はほとんど見当らず、時折、ある特定な流域に関して断片的な調査が行なわれているに過ぎず、わが国の河川流域の性格については不明な点が極めて多いといわねばならない。

そこで、本研究は、わが国の河川上流域を対象としてかなり巨視的な立場から洪水流出に及ぼす地形効果を実証的に解明しようとしたもので、意図したところはつぎの3点である。

(1) 河道網および流域の構成に関して米国などで用いられている order analysis の方法がわが国で適用できるかどうかを検討する。

(2) そうした手法の有効性が認められれば、各order 毎に河道および山腹を分類し、流出に関係する地形要素の性格を詳細に調査する。

(3) 全国的な資料を用い、気象・地質的な側面を考慮することによって、地域的な流域特性を明らかにする。

Table 1 Objective river basins

番号	気候区*	ダ ム 名	河 川 名	流域面積	河 道 の 最大次数
1	I	木 屋 川	木 屋 山	84 km ²	3
2	〃	湯 原	旭 川	255	4
3	〃	荒 沢	最 上 川	162	4
4	〃	鎧 畑	雄 物 川	320	5
5	〃	目 屋	岩 木 川	172	4
6	II - 1	市 房	球 磨 川	158	5
7	〃	芹 川	大 分 川	118	4
8	〃	永 瀬	物 部 川	295	4
9	II - 2	佐 波 川	佐 波 川	88	4
10	〃	鹿 野 川	脇 川	158	5
11	〃	引 原	揖 保 川	48	3
12	II - 3	宮 川	宮 川	126	4
13	〃	美 和	天 竜 川	311	4
14	II - 4	二 瀬	荒 川	170	4
15	II - 5	花 山	北 上 川	127	4
16	〃	石 湫	北 上 川	154	4

* 年降水量からみた気候区分「日本の水資源」, 資源調査会報告第19号による。

2. 対象流域と解析方法

まず、研究の対象とした流域は Table 1 および Fig. 1 に示したような16河川の最上流に属するもので、

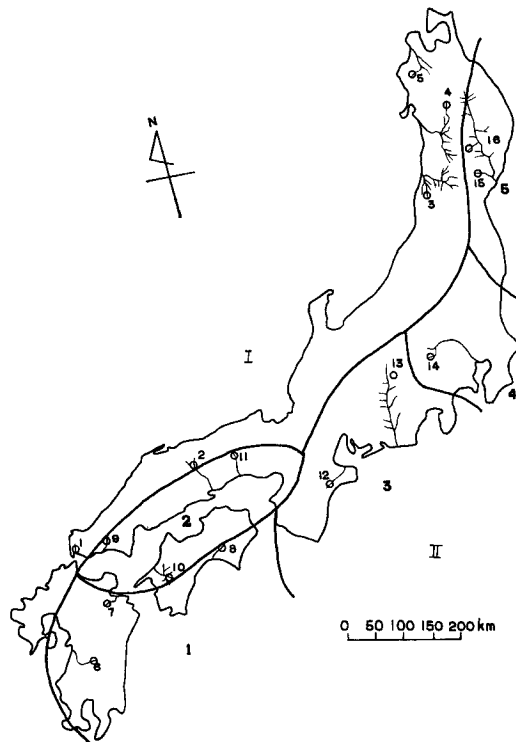


Fig. 1 Objective river basins and its classification of climatic features mainly on the difference of annual precipitation. Numbers refer to basins described in Table 1.

これらは後日流量記録をも解析に加えることを考慮して洪水記録の存在する多目的ダムの上流にとってある。これらの流域は流域面積が 48~320km²、河川の order 数は 3~5 次であり、また年降水量の相違による気候区の分類⁵⁾では、北海道を除いた各種の気候区を包括している。したがって、これらは全国的にみて河川上流域としてかなり一般的なものといえるであろう。

つぎに、各流域内でまず河道を Horton の提案した order によって分類し、ついで、山腹斜面も同様に order 毎に分けた。さらに、これら order 毎の河道の数および距離、斜面の面積、標高、勾配などを 5 万分の 1 の地形図より算出することによって以後の研究を進めた。その 1 例として山口県の西部、吉田川上流木屋川にある木屋川ダム流域を Fig. 2 に示してある。

3. 河道の性格

(1) 河道網の発達

流域内で河道網がどのように発達しているかを知るためには、各流域において order 毎の河道の数を比較すればよいが、さらに流域の大きさを考慮して統一的に表示するために Horton の提案になる河道密度を用いた。すなわち、流域面積を A 、order 数 ω に対する河道の数を N_ω とすれば河道密度 F_ω は次式で与えられる。

$$F_\omega = N_\omega / A \dots \dots \dots (1)$$

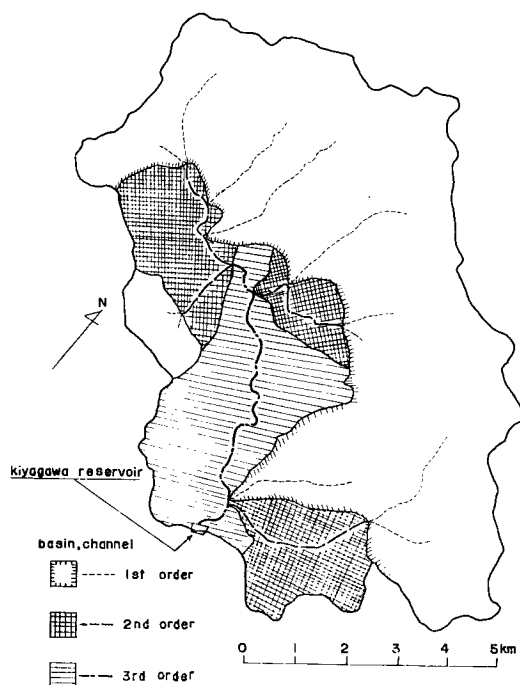


Fig. 2 An example of the method of calculation at the upper basin area of Kiyagawa Reservoir.

この $F\omega$ を Fig. 2 で示された気候区に基づいて整理し、横軸を order 数、縦軸を対数目盛で表わした河道密度でもってプロットしたのが Fig. 3-a, b, c である。なお、以後簡単のために流域名は Table 1 の番号を用いることにする。この図を見れば、気候区 I 群では流域 2 (湯原)、II-1 で 7 (芹川) および II-2 の 10 (鹿野川) が各区分の中で異なっているが、他は同一の気候区では、プロット点に適合するように引いた直線の傾斜がほとんど変わらない。つまり、order が変わる度に河川が分岐する比率がほとんど変わらないといえよう。ところで同一気候区でも、たとえば裏日本気候区 I において、東北地方西部の三河川は河川密度が大きいのに反し、山陰地方の二河川は小さいというように河川密度 (Fig. 3 での縦距) の相違がみられる。この違いは流域の浸食の進化の相違により、原理的には、降雨強度と雨水に対する地盤の抵抗性の間の相対的關係によるものであろう。この場合は、後述する流域の斜面勾配の違いが主な原因であるように思えるが、詳細は不明である。

また、同一気候区の中で河道の分岐比の異なるものを地形・地質的に調べてみると、たとえば湯原ダム流域は中国山脈の蒜山高原より発し、芹川ダム流域は九州の九重山の麓に位置し、共に旧火山の裾野で一向への傾斜性の強い流域である。さらに、鹿野川ダム流域は四国を東西に横断する中央構造線上にあり地質的な一方向性が極めて強い流域である。

以上、要約すれば、同一の気候区では著しい地形・地質的な方向性がなければ上流河川の分岐がほぼ等比的であるといえるようで、米国などで報告されている事実とよく合致する。

(2) 河道長の性格

ついで、order 毎に河道の長さがどのように変わるかを調べてみよう。いまある流域において order 数 ω

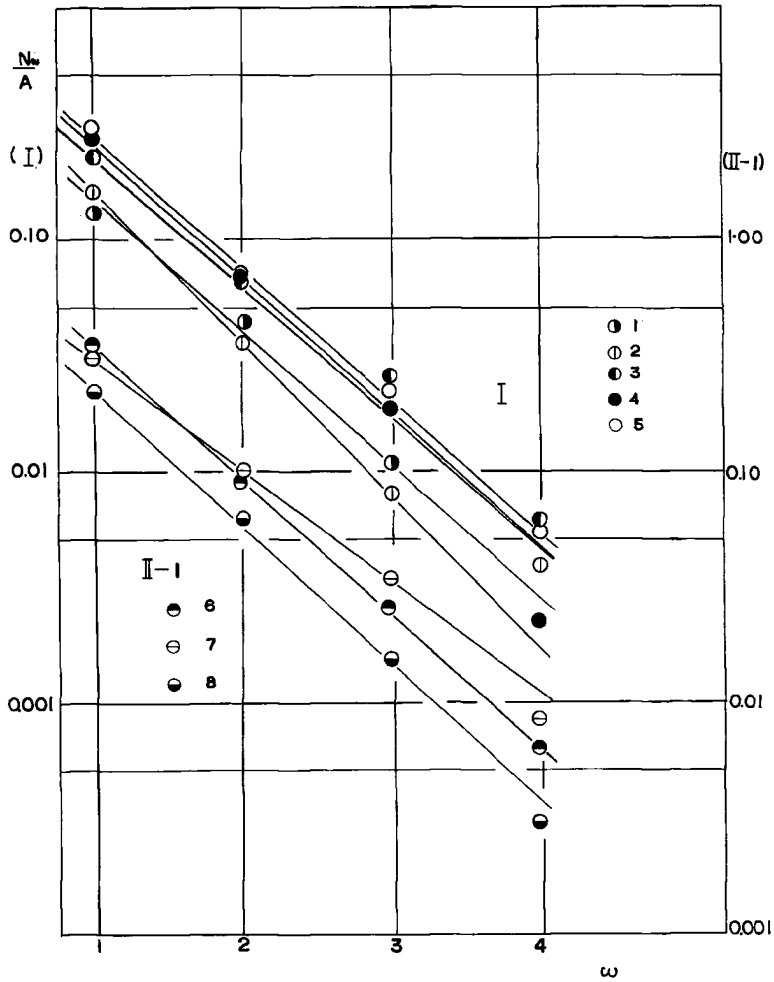


Fig. 3 (a) Relation between stream frequency and stream order.
Numbers refer to basins described in Table 1.

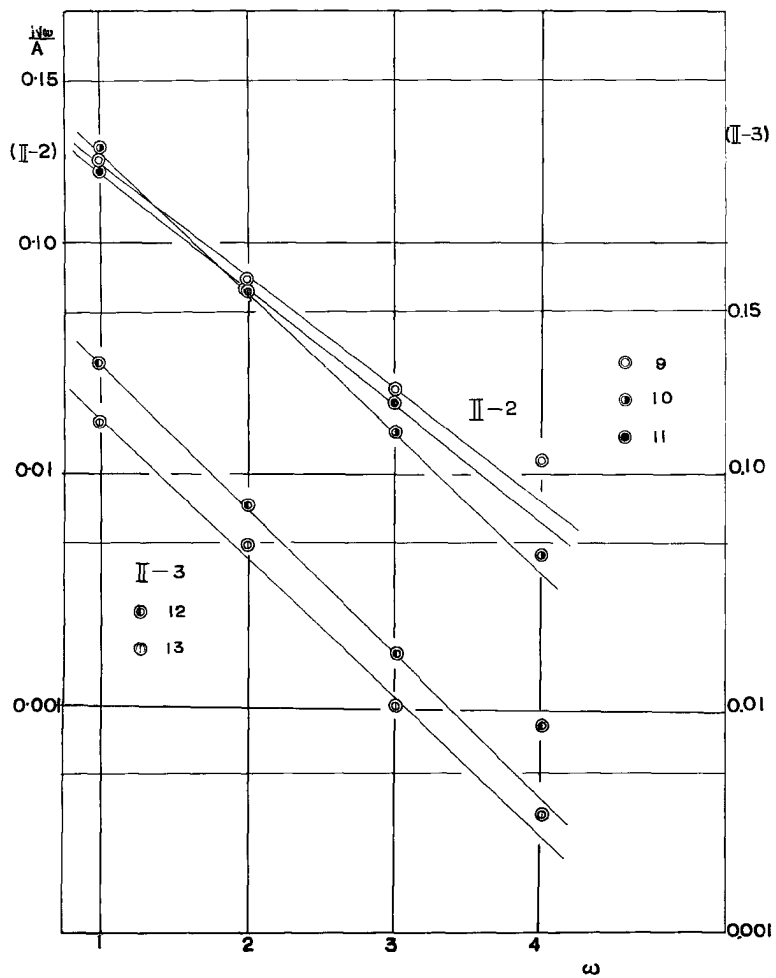


Fig. 3 (b)

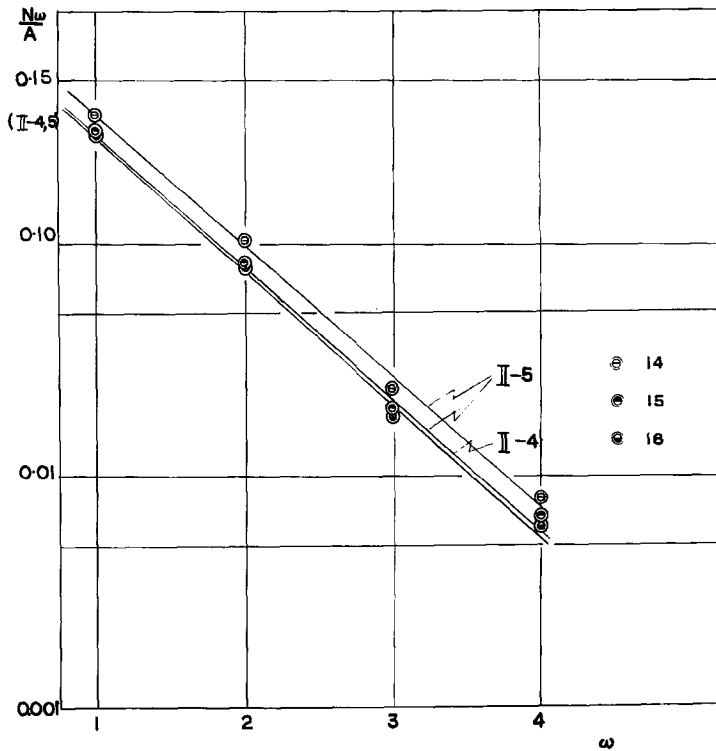


Fig. 3 (c)

の河道の総数 N_ω の総延長を $\sum_{i=1}^{N_\omega} L_{\omega i}$ とすれば、河道 1 本当りの平均距離 L_ω は次式で与えられる。

$$L_\omega = \frac{\sum_{i=1}^{N_\omega} L_{\omega i}}{N_\omega} \dots\dots\dots (2)$$

その結果を、横軸に order 数、縦軸に平均河道長を対数目盛で表したものが Fig. 4-a, b である。これを見れば、河道長は気候区によってほとんど関係しないで、全体的にある特定の傾向が存在するようである。そこで、全資料から上流の 1, 2, 3 次の河道長について、平均値 $\bar{L}_\omega$ 、標準偏差 σ_{L_ω} および変動率 $\sigma_{L_\omega}/\bar{L}_\omega$ を計算した結果が Tbel 2 に示してある。たとえば、order 1 の河道では各河川毎の平均値 L_ω の範囲は、0.80~1.61km で、この分布をほぼ正親分布であると仮定すると、その約 68% が含まれる $\bar{L}_\omega \pm \sigma_{L_\omega}$ の範囲は 0.86~1.24km で、かなり一定した値で平均 $\bar{L}_1=1.05\text{km}$ のまわりに集中していることがわかる。さらに、order 2 の河道については 1 本当りの距離が order 1 のものより長くなり、その範囲も 1.75~2.65km と少し大きく変動するが、それでも平均値 2.20km にかなり近接した値であるといえる。ところが、order 3 になれば平均値としては、6.02km と増加傾向にあることは認められるが、変動範囲が 2.48~8.56 km と拡大され、order 1, 2 の河道長のように各流域の平均がほぼ定まった数値であるということはいえないようである。

4. 山腹斜面の性格

(1) 流域面積の性格

山腹斜面の order 的な性格を調べるために、まず order 毎の流域面積を比較すればよいが、まず河道長

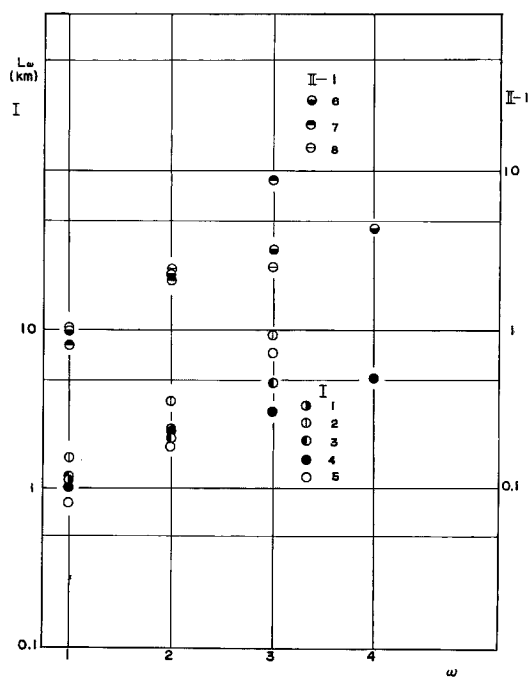


Fig. 4 a, b Relation between mean stream length and stream order. Numbers refer to basins described in Table 1.

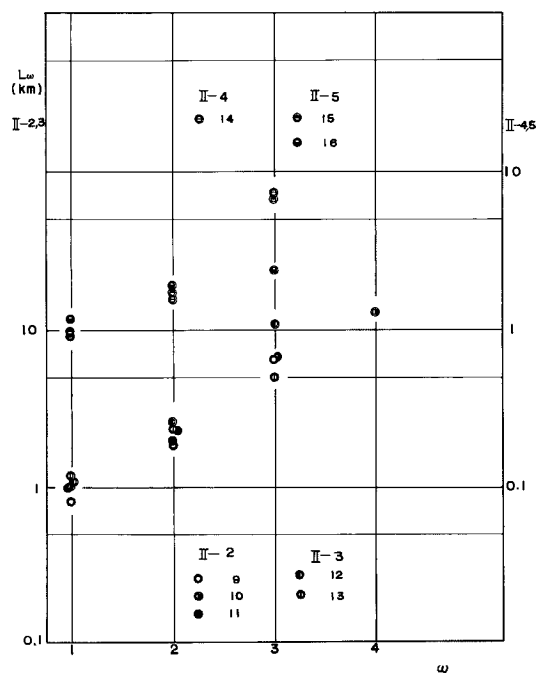


Table 2 Mean, standard deviation and variation ratio of mean stream-segment length on order.

オーダー数 ω	1	2	3
平均値 L_{ω}	1.05 km	2.20	6.02
標準偏差 $\sigma_{L_{\omega}}$	0.187	0.450	2.540
変動率 $\sigma_{L_{\omega}}/L_{\omega}$	0.178	0.204	0.422

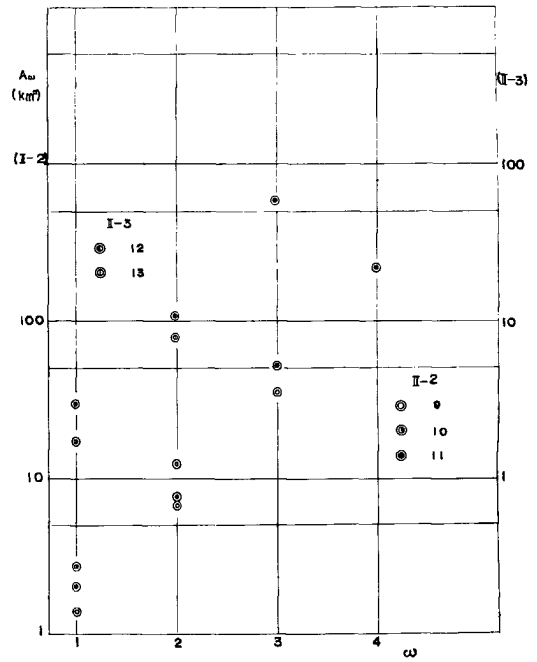


Fig. 5 (b)

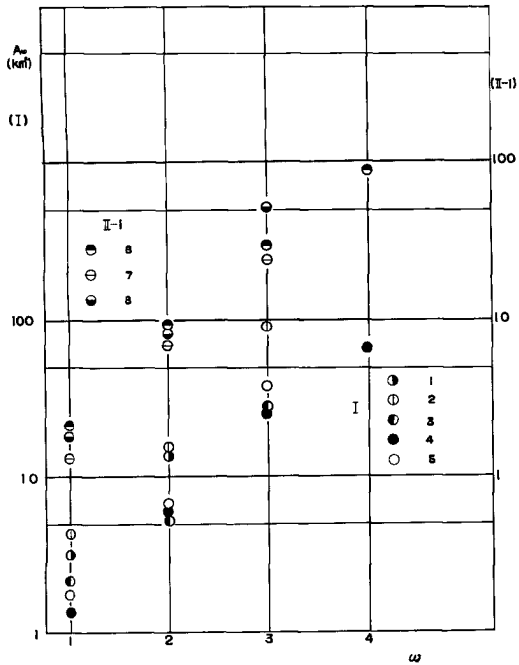


Fig. 5 (a) Relation between mean basin area and stream order. Numbers refer to basins described in Table 1.

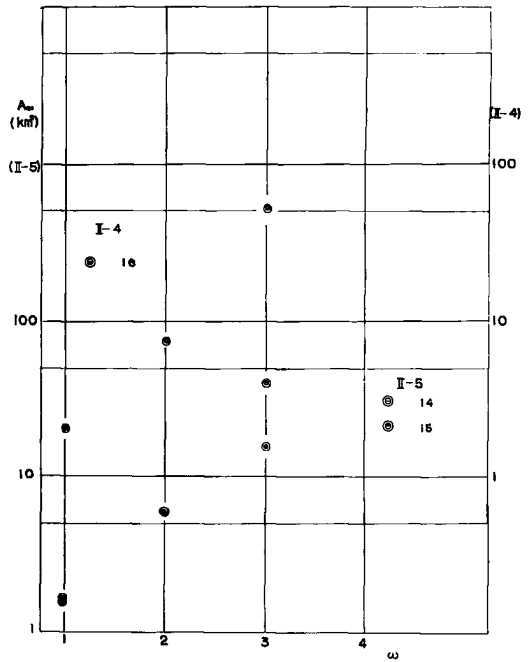


Fig. 5 (c)

の場合と同様に、河道1本当りの数値を用いて比較した。すなわち、order 数 ω の河道より上流の全流域面積を $\sum_{i=1}^{N_\omega} A_{\omega i}$ (N_ω : order ω の河道総数)とすれば、河道1本当りの平均の面積 A_ω は次式で与えられる。

$$A_\omega = \frac{\sum_{i=1}^{N_\omega} A_{\omega i}}{N_\omega} \dots\dots\dots (3)$$

この結果を、横軸に order 数、縦軸に対数目盛でとった河道1本当りの面積をとってプロットしたのが Fig. 5-a, b, cである。図によれば、両者は気候区にあまり関係がなく、全体的に order 数 ω が増すにつれて、単位流域面積 A_ω がほぼ指数的に増加し、増加の割合がほぼ等しいことがわかる。しかしながら、河道長のように order 毎にかなり安定した値とはならず、全国的に数倍にも及ぶ変動を示している。そこで流域を河道に付着した山腹斜面であるという観点から斜面長の性格を調べてみた。

(2) 山腹斜面の長さ

斜面の洪水流出に及ぼす効果を詳細に把握するために、Fig. 2に示したように、各 order ω 毎の河道に流

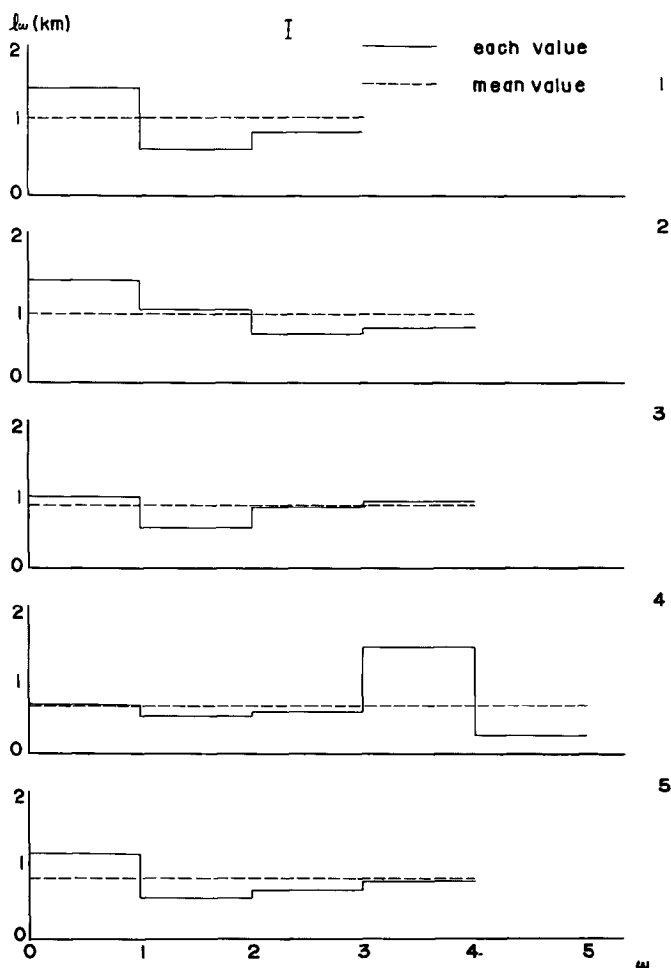


Fig. 6 An example of the relation between mean slope length and stream order in I domain. Numbers refer to basins described in Table 1.

入する山腹斜面をそれぞれ単独の流域 $A_{0\omega i}$ に分割し, $\text{order}\omega$ の河道に至る斜面の平均的な斜面長 l_ω を次式で算出した。

$$l_\omega = \sum_{i=1}^{N_\omega} / 2 \sum_{i=1}^{N_\omega} L_{\omega i} = A_{0\omega} / 2L_\omega \dots\dots\dots (4)$$

すなわち, $\text{order}\omega$ の河道に両側の山腹より直接流入する全面積 $A_{0\omega}$ を, その河道延長 L_ω を一辺とする矩形流域に換算し, 他辺の半分を両山の流下距離とみなしたのである。

この平均斜面長 l_ω は, Horton の提案した Drainal density の逆数, あるいは Schumm⁴⁾ が Constant of channel maintenance と呼んでいる値を order 毎に求めたもので, 洪水時の表面流出の挙動を支配する重要な地形要因であると考えられる。

さて, たとえば気候区 I における計算結果を示する Fig. 6 のようになる。図中の実線はその order に相応する値, 点線は流域全体の平均値であり, 右側の数字は流域番号である。これより $\text{order} 1 \sim 3$ の斜面では, $\text{order} 1$ つまり最上流支川の斜面長が他のものに比してかなり大きく, $\text{order} 2$ では若干小さく, $\text{order} 3$ では少し大きくなるが, $\text{order} 2, 3$ ではかなり定まった値をとる傾向があることが予想できる。

そこで, 全部の資料について, order 別に斜面長の平均値, 標準偏差および変動率を算出したのが Table 3 で, 上述の傾向が明確に認められるであろう。また, Fig. 7 で示した流域全体での平均の斜面長 l と各

Table 3 Mean, standard deviation and variation ratio of mean slope length on order.

オーダー数 ω	1	2	3
平均値 l_ω	2.03 ^{km}	1.30	1.50
標準偏差 $\sigma_{l\omega}$	0.525	0.327	0.242
変動率 $\sigma_{l\omega}/l_\omega$	0.259	0.252	0.161

order に対する斜面長 l_ω の関係を見れば, $\text{order} 1$ では他と比べて l と l_ω の間の相関性が弱いことがわかる。

前述したように, 全国的に, 上流の $\text{order} 1, 2$ の河道長が流域平均的にみてほとんど相違がないことと, ここで述べたように下流の $\text{order} 2, 3$ の山腹斜面長がかなり一定した値を示すことを同時に考慮し, 下流の $\text{order} 3$ 程度の河道での洪水変形はかなり明らかになっているということを併せ考えれば, ここで対象としている程度の規模の流域では, 最上流の山腹の斜面長がもっとも重要な流出特性を示す要因であるといえよう。

(3) 山腹斜面の勾配

河川流域に与えられる外力の根本は降雨の持つ potential energy であるから, 河道および斜面の勾配は極めて重要な地形要素である。ここでは, 前述の意味でもっとも重要と考えられる斜面の勾配について研究を行なった。

さて, すでに述べたように, 流域は長年の間に, 浸食が進み, 外力としての降雨と運動の場である流域の地形・地質の間にある種の平衡に近い状態が存在していると考えることができよう。したがって斜面勾配をとってみても, 降雨および地質条件が同じであれば, 他の地形要素との間にある種の平衡が成立しているであろう。

いま, ある傾斜をもった長い山腹斜面を想定すると, 山腹を流下する雨水の下方浸食力が一定の値に達すれば水道を発達させると考えられる。ところで傾斜・地質および植生がが一樣であればある流下距離に達す

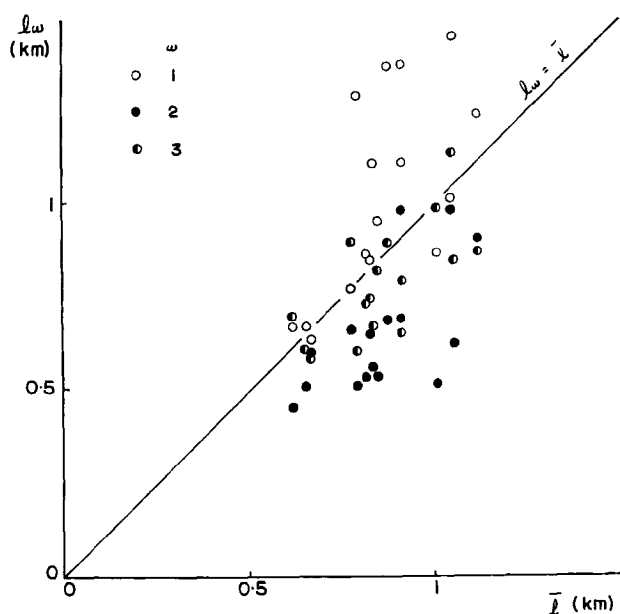


Fig. 7 Relation between mean slope length for stream order and average slope length for total basin area.

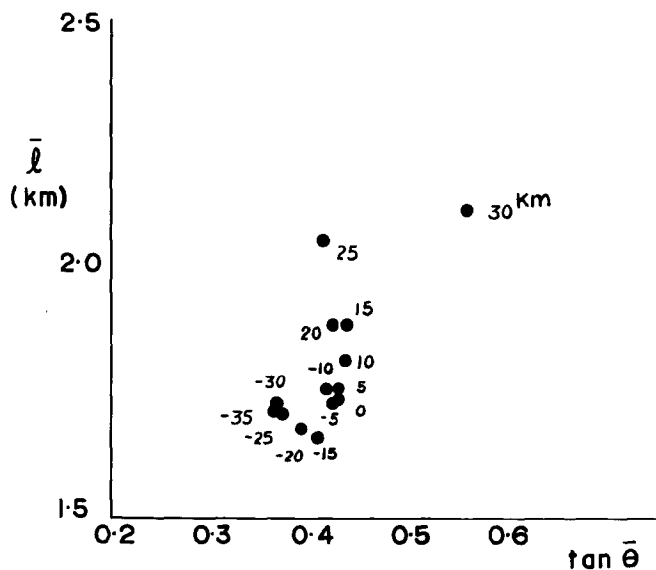


Fig. 8 Relation between slope length and slope angle for the Yoshino River above Gojyo City, Nara.

れば浸食が始まると考えられる。このような河水の作用の集積として現在の河状が形成されているのであれば、斜面勾配と斜面長の間は何らかの関係が、地質・気候の様な流域では見出されるはずである。

そこで斜面長と斜面勾配の関係を紀の川水系吉野川上流域における 1/50,000 の地形図より算出した結果が Fig. 8 である。なお、図中のプロット点の添字は最長の河道に沿った距離 (km) を示し、原点を大滝ダム地点、正の方向を上流側にとってある。たとえば25の点では、大滝上流 25km 地点より上流の流域平均の斜面長と斜面勾配の関係を表わしている。なお斜面勾配は、流域を 1 km 間隔の方眼に分け、各格子点を通り等高線に垂直に山背線より河道まで測った距離を l_j 、標高差を h_j 、格子点数を N とすれば、平均的に次式で得られる。

$$\tan \bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N h_j / l_j \dots \dots \dots (5)$$

図をみれば、多少ばらつきはあるが、勾配が増すにつれて平均斜面長が増し、両者の間には線型的な関係が強いことがわかる。

この事実に基づいて、平均斜面長と平均斜面勾配との関係を、とくに洪水流出に関連の強い order 1 の流

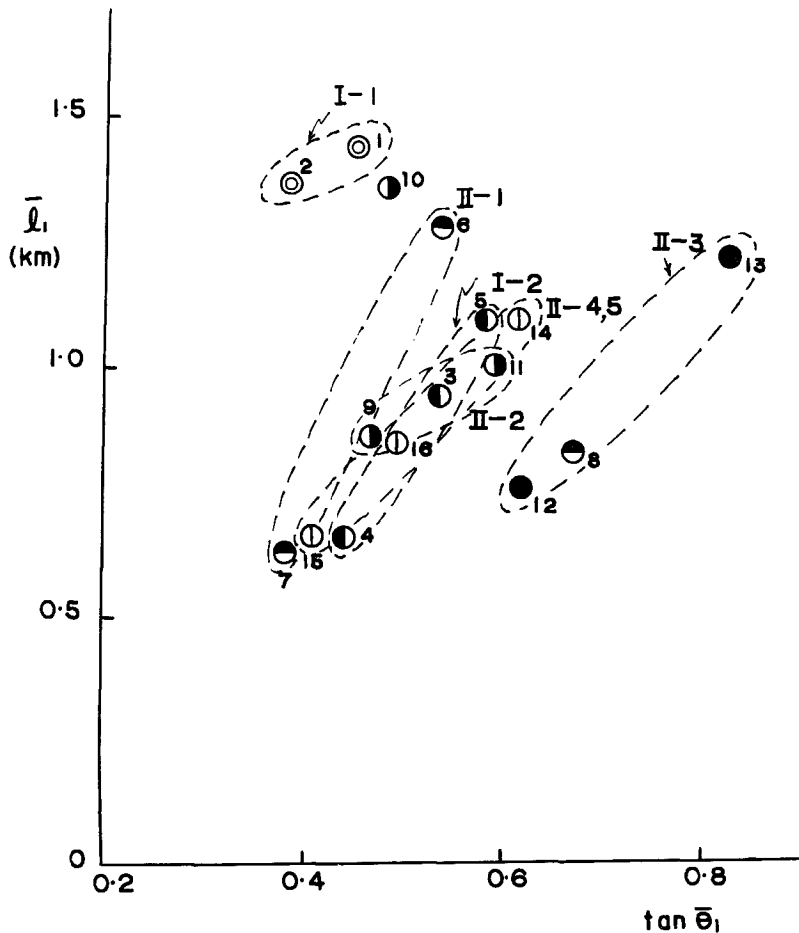


Fig. 9 Relation between mean slope length and mean slope angle for the 1st order stream basins. Number refer to basins described in Table 1.

算についてプロットしたのが Fig. 9 である。なお、平均斜面勾配は寺田博士による簡易法によった⁶⁾。すなわち、地形図に2cm毎に格子を描き、格子点を中心として直径5mmの円を描き、その中に含まれる等高線総数を $\sum h$ 格子点総数を N とすれば、流域の平均傾斜は次式で与えられる。

$$\tan \bar{\theta} = \frac{20}{5 \times 10^{-8} \times 50,000} \times \frac{\sum h}{N} = 0.08 \times \frac{\sum h}{N} \dots\dots\dots (6)$$

ただし等高線間隔は20m毎に1本と勘定する。

図をみると、流域番号8(永瀬)、10(鹿野川)のように傾向の異なるものもあるが、全体として、一つの気候区内では、正の相関をもった線型的関係が存在するようである。さらに多数の資料に基づいて詳細な検討をしなければならないであろうが、現在の資料でこうした関係を示す領域を点線で囲んでおいた。なお、気候区Iは河道網の発達に関してもそうであったが、二分することができるようで、南部をI-1、北部をI-2で記してある。なおこうした気候区の分類は、同時に地質的な数似性もかなり含んでいるものと想像される。したがってこのような流域の地域特性が明確になれば、従来、単に流出係数や粗度係数といったあいまいな形でしか表現できなかった流出解析が一段と合理的なものとなるであろう。

5. む す び

以上、わが国の各地の多目的ダム上流の流域を対象として、order analysis を中心にして流域のもつ洪水流出に及ぼす効果を研究したが、明らかにされた点を要約するとつぎようになる。

(1) 河道網の発達を調べると、上流の order 1, 2 の河道では同じ気候区では、地質的に著しい不均一性がなければ、ほぼ分岐の割合が等しい。

(2) 流域毎に平均した河道長では、上流の order 1,あるいは2の河道ではほとんど定まった値を示す。

(3) order で分類した山腹斜面に関して、平均的な斜面長が order 1 がもっとも長く、その変動も大きい。下流の order 2, 3 ではやや減少し下流ではやや増すが、全国的にほとんど定まった値を示す。

(4) 山腹の斜面長と斜面勾配の間には正の相関が強く、気候区によって一定の関係が存在する。

なお、今後は実際の流量記録に基づいて、以上の推論の検討および展開を計っていきたいと考えている。

文末ではあるが、本研究作成に始終熱心に御指導を頂いた防災研究所石原安雄教授、計算・図面作成などの労をわずらわせた学生古沢裕君および資料収集に御協力頂いた関係者の皆様方に厚く感謝して筆を置かせて頂きます。

参 考 文 献

- 1) Horton, R. E. : Drainage basin characteristics, Trans. Am. Geophys. Union, vol. 13, 1932, pp. 350~361.
- 2) Langbein, W. B. : Geometry of river channels, Proc. Am. Soc. Civil Engrs., J. Hydraulics Div., vol. 90, no. HY2, 1964, pp. 301~347.
- 3) Smith, K. G. : Erosional processes and landforms in Badlands National Monument, South Dakota, Bull.
- 4) Schumm, S. A. : Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey, Bull. Geol. Soc. Am., vol. 67, 1956, pp. 597~646.
- 5) 「日本の水資源」, 資源調査会報告第19号, 日本の資源問題第2編, 1951, pp. 12~13.
- 6) 井上修次他, 「自然地理学, 地形篇」, 地人書館, 1961, p. 285.