

## 山腹斜面特性量の確率統計的特性

平松, 和昭  
九州大学農学部排水干拓工学教室

田中, 宏平

四ヶ所, 四男美  
九州大学農学部排水干拓工学教室

森, 健  
九州大学農学部排水干拓工学教室

<https://doi.org/10.15017/22231>

---

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 41 (1/2), pp. 35-45, 1987-02. 九州大学農学部  
バージョン：  
権利関係：

## 山腹斜面特性量の確率統計的特性

平松和昭・田中宏平\*  
四ヶ所 四男美・森 健

九州大学農学部排水干拓工学教室  
(1986年6月24日 受理)

## Stochastic Properties of Hillslope Parameters

KAZUAKI HIRAMATSU, KOHEI TANAKA\*, SHIOMI SHIKASHO  
and KEN MORI

Laboratory of Land-Drainage and Reclamation, Faculty of  
Agriculture, Kyushu University 46-05, Fukuoka 812

### 序 論

山地流域の洪水流出現象は、流域を構成する個々の斜面での雨水の流下運動という水理学的側面を持つている一方で、山腹斜面に代表されるように、非常に複雑な要素からなるという確率統計的側面も併せ持つている。この複雑さが故に、個々の流れを分布定数系として捉え、これを総合化しようとするアプローチはきわめて面倒となつてくる。そこで、従来より個々の流れを何等かの形で平均化し、実現象により近い挙動を示すようなモデルパラメータを与える集中定数系としての取り扱いが、実用的解析法の主流となつている。

著者らは、複雑な現象は何等かの平均量を通して把握すべきとの認識にもとづき、山地小流域の洪水時の流域貯留量に注目することによつて、斜面スケールでの平均的な雨水の挙動の把握を試みている(平松ら, 1985)。その際、流域貯留量と流域流出量との関係の特性を明らかにするため、分布定数系モデルによる数値シミュレーションを行つている。ところが、Freeze (1980)あるいは瀬口ら(1986)が指摘しているように、山腹表層の透水係数に代表されるような、本来きわめて空間的バラツキの大きい山腹斜面上の水理学的パラメータを、シミュレーションにおいて決定論的に取り扱ふと、実現象と等価な挙動を再現することはほとんど不可能となる。そこで、Freeze (1980)は、ある確率分布をもとに模擬発生させた水理学的パラメー

タで一連の流出計算を行うという試行を複数回繰り返す、その標本平均をもつて流域流出量の最確値とする、いわゆる an event-based Monte Carlo simulation の手法を示している。

著者ら(平松ら, 1985)の数値シミュレーションもこの方法論に立つているが、その際、模擬発生させる水理学的パラメータの確率統計的特性は、現在のところよく知られていないものが多い。そこで、数値シミュレーションの下準備として、著者らがここ数年来、山地流域における洪水流出機構の検討対象としてきた試験流域において、これらパラメータのサンプリングを行つた結果、興味ある知見が得られたので、本論文ではこれを報告する。

ところで、従来より空間的バラツキを持つ物理量を表現する用語として、“非一様な”、“不均一な”などといった表現が漠然と用いられており、用語法に多少の混乱が見られる。これに対して、Greenkorn and Kessler (1969)は明確な定義を示している。すなわち、彼らは対象としている物理量の持つ確率密度関数に注目し、確率密度関数が有限個のデルタ関数の線形和で表現できる場合を一様(uniform)、そうでない時を非一様(nonuniform)、一方、確率密度関数が単一モードであるなら均一(homogeneous)、複数モードの場合は不均一(heterogeneous)と定義した。Fig. 1に確率密度関数 $f(k)$ による四つの例を概念的に示す。本論文でも、この用語法に従つた。

本研究の遂行にあたり、佐賀大学農学部瀬口昌洋助教授に終始有益な御助言をいただいた。観測にあつ

\* 小郡市津古 1260

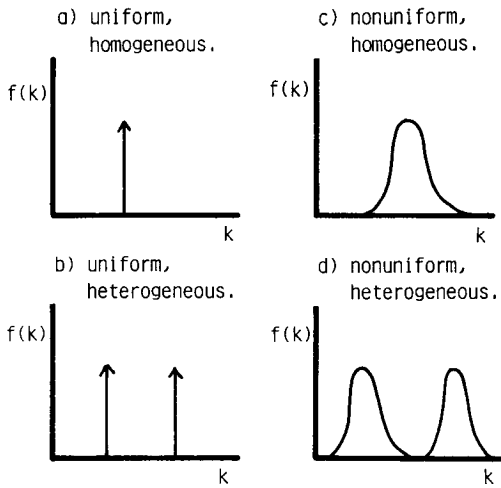


Fig. 1. Greenkorn and Kessler's (1969) definitions of uniformity and homogeneity.

では、九州大学農学部付属演習林柏屋地方演習林に試験流域を設置した。また、本研究の一部は文部省科学研究費（一般研究（B）、代表者四ヶ所四男美）の援助を受けた。記して謝意を表する。

### 山腹斜面特性量

山地流域の山腹斜面は、一般に、植物などの腐朽した porous な表層に覆われていて、その透水性は、表層直下の土層に比して非常に高い。高棹（1963）はこのような porous な表層をA層、Dreibelbis（1962）は、zone of major hydrologic activity と称し、洪水流出現象におけるその重要性を指摘している。山腹表層に降った雨水は、この表層での高い浸透性により即座に下方に浸透し、表層直下の土層との境界に達すると保留され、やがて重力ポテンシャルが毛管ポテンシャルを上回るようになると、側方浸透流が発生する。この場合、表層内の不飽和部は浸透によつてすでに保湿されており、また、保持されている水分は、重力ポテンシャルを上回る毛管ポテンシャルを持つていると考えられるので、結局、飽和に関与する空隙を小さくすることになる。従つて、表層内の空隙は、その分を考慮した有効間ゲキを対象としなければならない。そして、表層がほぼ飽和すると地表面流が発生することになる。山腹斜面上の雨水の流下形態としては、これ以外に、降雨強度が山腹地表面の浸透能を超過することによつて生じる Horton 型地表面流、あるいはパイプ流、水みち流などが報告されているが、おおむね上記のようなプロセスが基本となつて、雨水は斜面を流

下し河道に至つていると考えられる。以上のような山腹斜面上での水文過程を考える場合、雨水の流下特性を規定する要因として、落葉層厚、表層厚、表層の透水係数および有効間ゲキ率がきわめて重要となつてくる（平松ら、1985）。そこで、この4つの山腹斜面特性量のサンプリングを行った。サンプリングにおけるこれらの定義は以下とした。

#### i) 落葉層厚 ( $f$ )

落葉などの集積している層を落葉層と定義し、その厚さを落葉層厚とする。この層は、土壌学の A<sub>0</sub> 層にはほぼ相当していると考えられる。

#### ii) 表層厚 ( $d$ )

落葉層直下の土壌のうち、洪水流出に寄与するような速い側方浸透流を生じうる土層を表層と定義し、その厚さを表層厚とする。ただし、そのような洪水流出の時間スケールに見合った透水性の基準をどこに置いか明確でない上、仮に透水性をもとにしてある基準を置いたとしても、実際のサンプリングにおいてそのような土層を視覚的に判断することはほとんど不可能である。そこで、サンプリングにあつては、落葉層直下の土層に比して、明らかに異質かつ密な土層となつてるところまでをもつて表層とした。この層は、土壌学のA層およびB層の一部に相当すると考えられる。

Fig.2 は、予備観測として、Fig.3 に示す試験流域内のテンシオメータ設置区域に隣接した地点で、飽和透水係数の鉛直プロファイル測定したものである。なお、飽和透水係数は定水頭法で測定した。図中に示

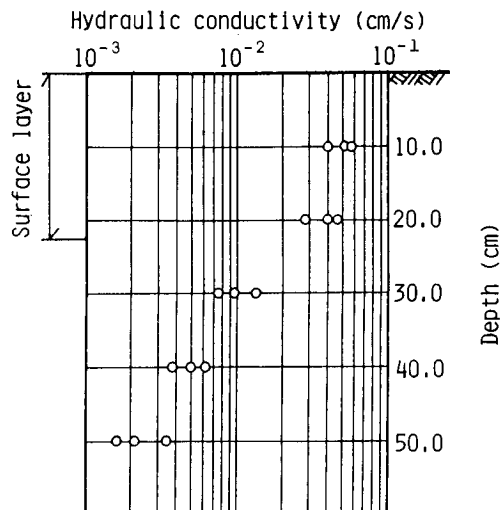


Fig. 2. Hydraulic conductivity profiles and the surface layer.

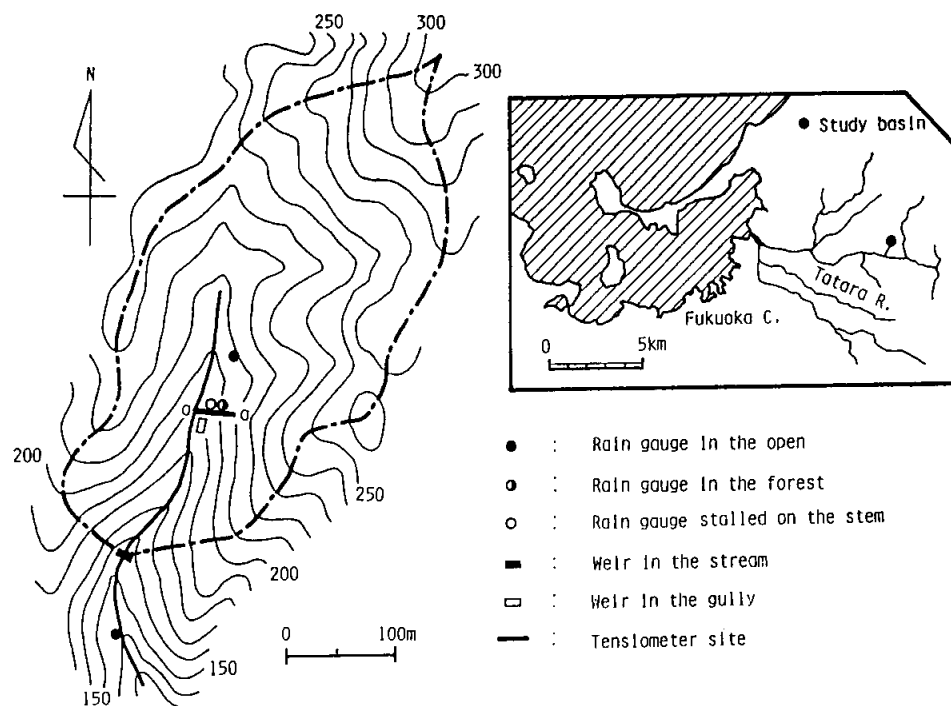


Fig. 3. Physiographical map of the Ochohzu study basin.

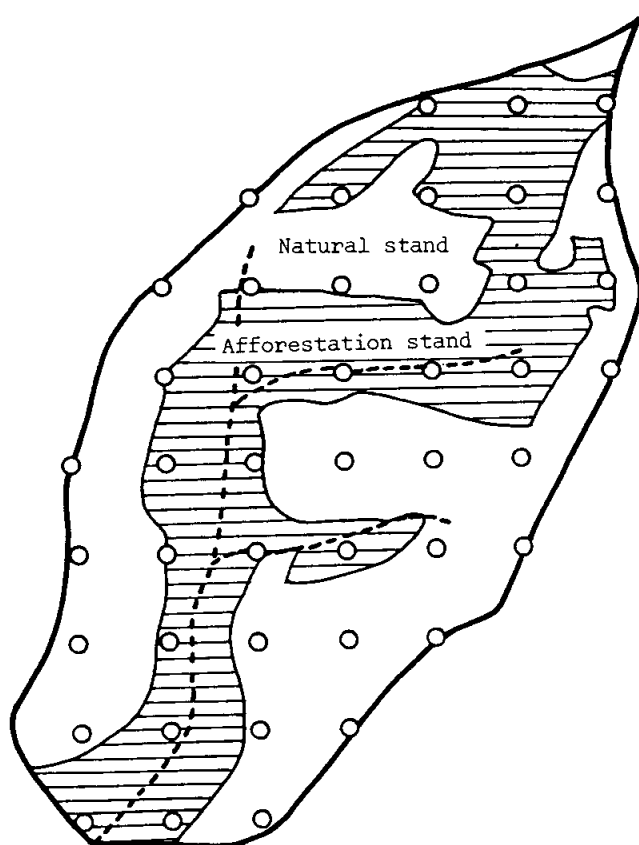


Fig. 4. Location of sampling points and vegetation cover.

した表層とは、上記の方法に従って表層と判断した部分である。表層下端と判断された深さ 20 cm 付近に、透水係数の急激な減少が認められ、下方浸透においてはこれ以深が制限的な土層となりうることを示している。また、降雨直後に行つたサンプリングに際し、上

記の方法により表層と判定された部分から側方浸透流を観測しており、側方浸透流の発生場としての表層の判定法として、上記の方法はほぼ妥当であろうと考える。

### iii) 透水係数 ( $k$ )

上記の表層内の土壌の飽和透水係数とする。

### iv) 有効間ゲキ率 ( $\lambda$ )

表層内土壌において、洪水流出の時間スケールに見合った透水性を提供する間ゲキの体積率とする。一般に、これがどのような間ゲキに相当するかは明らかではない。そこで、重力降水水として水分が排除される間ゲキにほぼ相当すると考えられる pF2 相当の間ゲキ (椎名, 1965) をもつて有効間ゲキと定義した。

## サンプリング対象流域

サンプリングは、Fig. 3 に示す九州大学農学部付属演習林粕屋地方演習林内に設けた御手洗水 (おちょうず) 試験流域を対象とした。当流域は、福岡市の東方約 15 km の地点に位置する流域面積 0.095 km<sup>2</sup> の山地小流域である。この流域の基岩の大部分は、三郡変成岩を構成する緑泥片岩より成り立っており、さらに基岩の上部に存在する表層土壌は黄褐色森林土壌より成り立っている。一方、この流域の植生は、Fig. 4 に示すように、河道に沿つた低位部が樹齢約 30 年のヒノ木の植林地、また中腹から尾根に至る中、高位部では、カシ、マツ類を中心とした雑木林で覆われており、これらの流域面積に占める割合は、それぞれ 44%、56%

Table 1. Basic data.

	Thickness of litter layer $f$ (cm)			Thickness of surface layer $d$ (cm)		
	Total	Afforestation	Natural	Total	Afforestation	Natural
Sample size	132	63	69	132	63	69
Mean	5.58	5.10	6.02	25.1	32.2	18.7
Standard deviation	3.07	2.44	3.49	17.6	17.2	15.4
Mean (ln)	1.55	1.51	1.59	2.95	3.33	2.60
Standard deviation (ln)	0.634	0.514	0.724	0.812	0.540	0.861

	Hydraulic conductivity $k$ (cm/s)			Effective porosity $\lambda$		
	Total	Afforestation	Natural	Total	Afforestation	Natural
Sample size	126	63	63	126	63	63
Mean	0.0384	0.0277	0.0492	0.156	0.152	0.160
Standard deviation	0.0727	0.0304	0.0971	0.0614	0.0504	0.0705
Mean (ln)	-4.18	-4.18	-4.17	-1.93	-1.94	-1.92
Standard deviation (ln)	1.35	1.17	1.52	0.365	0.325	0.402

である。

当試験流域は、山地山腹斜面での雨水の流下過程の詳細を明らかにするために設置されたもので(田中ら, 1982), Fig. 3 に示すように、まず、林外、林内および樹幹流下雨量を測定するため、4地点に雨量計が、また、a-a線上の3地点にそれぞれ3台ずつの自記テンシオメータが設置されている。さらに、流域および水みちからの流出量を測定するため、Fig. 3 に示す地点に自記水位計を備えたセキが設けられている。とくに、河道に設置したセキは、低水位から高水位にわたって流出量を精度良く測定するため、直角三角セキと四角セキとを組み合わせた複断面型のセキとしている。なお、水みちは、テンシオメータ設置区域に隣接しており、また、水みちのセキは表面から深さ約20cmの土層まで流出水を捕水できるように設置している。

当試験流域において、Fig. 4 に示すように、50cm間隔に配置した格子点上、計44地点(植林地21地点、自然林地23地点)でサンプリングを行った。すなわち、各地点において各々3個の穴を掘り、落葉層厚、表層厚を測定し、次いで100cc定容採土円筒により各穴ごとに1本ずつ採土を行った。これらの試料は、実験室において、まず吸引法により有効間ゲキ率を、次いで、定水頭法により透水係数を測定した。

## 結果及び考察

まず、測定結果の概要として、落葉層厚、表層厚、透水係数および有効間ゲキ率の平均と標準偏差、及び

自然対数変換値の平均と標準偏差を Table 1 に示す。以下、サンプリング結果をもとに、各変量が従う確率分布、確率統計的独立性及び斜面方向の線形トレンドに関して、議論を進めていく。その際、一つの基準として有意水準  $\alpha=5\%$  を採用し、各種棄却検定を行っていく。

ところで、Table 1 の各統計量を概観すると、表層厚に、植林地と自然林地の差異が顕著に見受けられる。ところが、Fig. 4 のように、植林地は河道に沿った低位部に面しており、後に述べるようにこの差異は斜面方向の線形トレンドで処理可能であるため、以下の議論では、植林地、自然林地の区別は敢てしないことにする。

### i) 確率分布

ここでの目的は、数値シミュレーションにおいて乱数を付与することになる各特性量が従っていると見做しうる確率分布を見出すことにある。ところが、物理的考察により確率分布を推定することは、ほとんど不可能であり、加えて Freeze (1975, 1980) がまとめているように、透水係数、間ゲキ率、圧縮率といった土壌物理パラメータは、正規分布、あるいは対数正規分布に従うとした報告が非常に多い。これは、両確率分布は取り扱いが容易であり、確率分布を検討する際に必ず持ち出されるため、あるいは、中心極限定理(Ang and Tang, 1975) により説明付けがしやすいことなどの理由によるが、この簡便さが故に、ここでも両確率分布を検討の対象とした。

**Table 2a.** Chi-square test for relative goodness-of-fit (The thickness of litter layer  $f$ ).

Interval (cm)	Observed frequency $n_i$	Theoretical frequency $e_i$ $(n_i - e_i)^2/e_i$			
		Normal	Log normal	Normal	Log normal
8.5 ≦	20	22.6	23.2	0.299	0.441
6.5 ≦ < 8.5	20	27.9	17.0	2.237	0.529
5.25 ≦ < 6.5	17	21.3	16.9	0.868	0.001
4.25 ≦ < 5.25	23	16.1	17.3	2.957	1.878
3.25 ≦ < 4.25	21	14.5	20.9	2.914	0.000
< 3.25	31	29.6	36.7	0.066	0.885
	132	132.0	132.0	9.341	> 3.704

**Table 2b.** Chi-square test for relative goodness-of-fit (The thickness of surface layer  $d$ ).

Interval (cm)	Observed frequency $n_i$	Theoretical frequency $e_i$ $(n_i - e_i)^2/e_i$			
		Normal	Log normal	Normal	Log normal
42.0 ≦	20	22.3	21.9	0.237	0.165
30.5 ≦ < 42.0	21	27.6	15.2	1.578	2.213
22.25 ≦ < 30.5	18	24.5	18.9	1.724	0.043
17.0 ≦ < 22.25	23	14.9	17.3	4.403	1.878
11.25 ≦ < 17.0	18	14.3	24.6	0.957	1.771
< 11.25	32	28.4	34.1	0.456	0.129
	132	132.0	132.0	9.355	> 6.199

**Table 2c.** Chi-square test for relative goodness-of-fit (The hydraulic conductivity  $k$ ).

Interval (cm/s)	Observed frequency $n_i$	Theoretical frequency $e_i$ $(n_i - e_i)^2/e_i$			
		Normal	Log normal	Normal	Log normal
0.06 ≦	20	48.4	19.7	16.664	0.005
0.03 ≦ < 0.06	20	20.4	19.7	0.008	0.005
0.0154 ≦ < 0.03	20	9.8	23.7	10.616	0.578
0.009 ≦ < 0.0154	20	4.2	19.4	59.438	0.013
0.0052 ≦ < 0.009	20	2.4	16.8	129.067	0.610
< 0.0052	26	40.8	26.7	5.369	0.018
	126	126.0	126.0	221.162	> 1.229

**Table 2d.** Chi-square test for relative goodness-of-fit (The effective porosity  $\lambda$ ).

Interval	Observed frequency $n_i$	Theoretical frequency $e_i$ $(n_i - e_i)^2/e_i$			
		Normal	Log normal	Normal	Log normal
0.210 ≦	20	23.8	20.0	0.607	0
0.175 ≦ < 0.210	20	23.8	18.4	0.606	0.139
0.1435 ≦ < 0.175	19	25.3	26.6	1.569	2.171
0.123 ≦ < 0.1435	21	15.9	20.3	1.636	0.024
0.1075 ≦ < 0.123	20	10.1	15.1	9.704	1.575
< 0.1075	26	27.1	25.6	0.045	0.006
	126	126.0	126.0	14.167	> 3.915

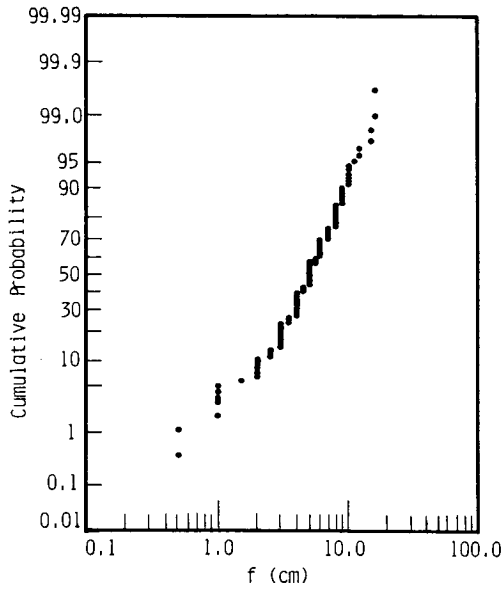


Fig. 5a. The thickness of litter layer ( $f$ ) plotted on log-normal probability paper by Hazen plot.

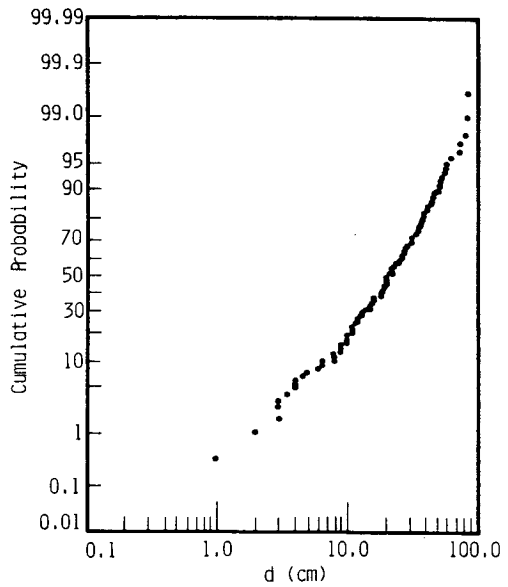


Fig. 5b. The thickness of surface layer ( $d$ ) plotted on log-normal probability paper by Hazen plot.

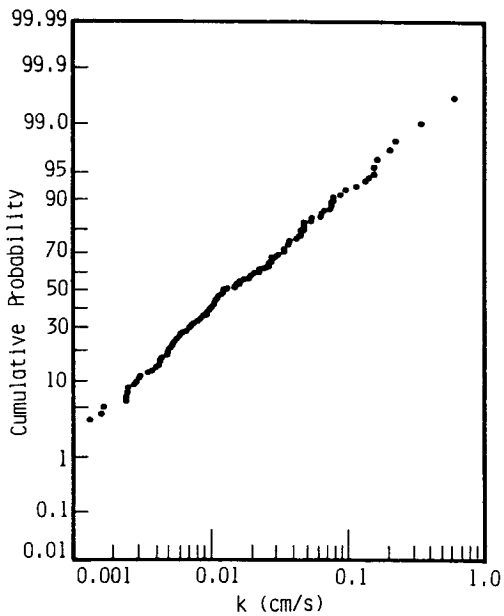


Fig. 5c. The Hydraulic conductivity ( $k$ ) plotted on log-normal probability paper by Hazen plot.

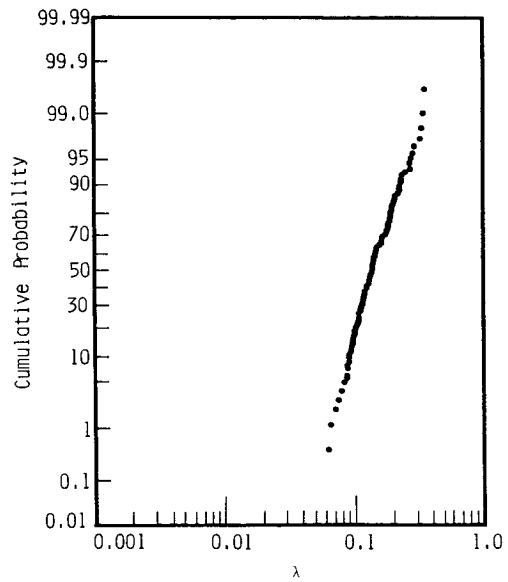


Fig. 5d. The effective porosity ( $\lambda$ ) plotted on log-normal probability paper by Hazen plot.

Table 2 は、各特性量に対して、正規分布、対数正規分布の相対適合度の  $\chi^2$  検定を行つたものである。すなわち、 $\chi^2$  検定は、変量の  $k$  個の区間に関する観測度数  $n_1, n_2, \dots, n_k$  と、仮定された分布から得られる理論

度数  $e_1, e_2, \dots, e_k$  とにより計算される次式

$$\sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (1)$$

は、 $n \rightarrow \infty$  において、自由度  $f = k - 1$  の  $\chi^2$  分布に収束

することを利用したものである (Ang and Tang, 1975). 理論モデルの母数が未知で、これをデータから推定しなければならない場合でも、推定が必要な未知母数 1 個につき自由度を 1 ずつ減ずれば、上の記述はやはり正しい。Table 2 では、いずれも対数正規分布の方が高い適合度が得られており、また自由度  $f=6-3$ 、有意水準  $\alpha=5\%$  に対する  $\chi^2$  分布の変数値が  $C_{1-\alpha, f}=7.815$  であることより、各特性量とも対数正規分布が有意水準  $\alpha=5\%$  で妥当なモデルとの結論を得た。Hazen plot を用いて、対数正規確率紙にデータをプロットした結果を Fig. 5 に示す。

以上のように、各特性量ともに対数正規分布に従うことが明らかになったことより、以後、自然対数変換値を対象とし、正規確率変数として、独立性、線形トレンドの検討を行っていくことにする。

ii) 確率統計的独立性

複数の確率変数を対象として乱数を発生させる場合、それらの確率変数が互いに確率統計的に独立であるか否かを明らかにしておかなければならない。すなわち、2つの確率変数が確率統計的に独立でないならば、この2つは別個に取り扱うことはできず、互いの依存性を考慮しなければならなくなってくる。

ところで、一般に、2つの確率変数が確率統計的に独立ならば、両者は無相関であるが、この逆は必ずしも真でない (Jazwinski, 1970)。しかし、2つの確率変数が正規確率変数ならば、両者は必要十分の関係となる (Jazwinski, 1970)。

前項では、4つの特性量はともに対数正規変数であることが示された。そこで、各特性量の自然対数変換値で相関係数を計算し、併わせて  $t$  分布検定を行うことにより、各確率変数間の相関の有無、従つて独立か

Table 3. Correlation coefficients between the thickness of litter layer ( $f$ ), the thickness of surface layer ( $d$ ), the hydraulic conductivity ( $k$ ) and the effective porosity ( $\lambda$ ).

	$\ln \lambda$	$\ln k$	$\ln d$
$\ln f$	$r=0.001$ $n=43$ $t_0=0.008$	$r=-0.080$ $n=43$ $t_0=0.517$	$r=0.093$ $n=132$ $t_0=1.069$
$\ln d$	$r=-0.275$ $n=43$ $t_0=1.835$	$r=-0.251$ $n=43$ $t_0=1.659$	
$\ln k$	$r=0.739$ $n=126$ $t_0=12.212$		

Table 4.  $\alpha$ -percent values of the  $t$ -distribution.

$n-2$	$\alpha$	
	0.05	0.01
41	2.021	2.704
124	1.980	2.617
130	1.980	2.617

否かの検討を行つた。 $t$  分布検定は、母相関係数  $\rho=0$  なる母集団より得られた標本相関係数を  $r$  とすれば、

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

は、自由度  $n-2$  の  $t$  分布に従うことを利用するもので (岸根, 1980), Table 3 に結果を示す。ここで、 $n$  はサンプル数、 $t_0$  は (2) 式により計算された  $t$  の実現値である。また、表中の  $n$  の値にばらつきがあるが、これは、Fig. 4 に示したサンプリング地点の中に、表層が薄く採土不能な地点があつたこと、落葉層厚と表層厚および透水係数と有効間ゲキ率の組み合わせ以外は、各サンプリング地点で得られた3つのサンプルの平均で相関係数を計算していることによる。Table 4 に示す有意水準  $\alpha=5\%$ 、自由度  $f=n-2$  に対する  $t$  分布の値と比較すると、透水係数と有効間ゲキ率の間に有意な相関が認められた。すなわち、この組み合わせ以外は確率統計的に独立と見做すことができる。

iii) 線形トレンド

Table 1 を示した際述べたように、主として河道に沿つた低位部に位置する植林地と、中腹から尾根に至る中、高位部に主として位置する自然林地では、特に表層厚の平均や標準偏差に顕著な差異が見受けられた。

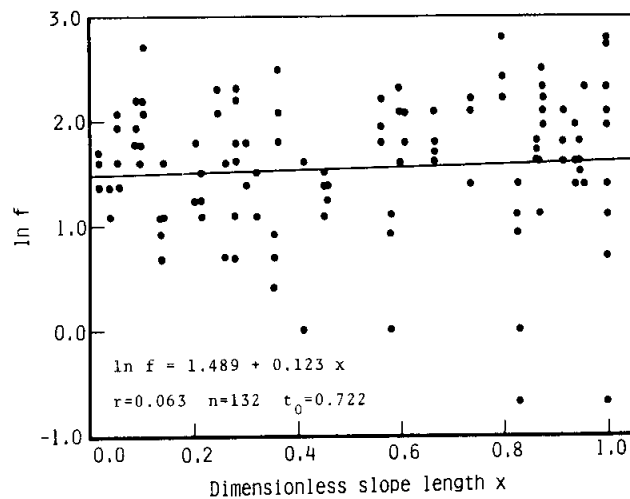


Fig. 6a. Test for the linear trend in the direction of slope (The thickness of litter layer  $f$ ).



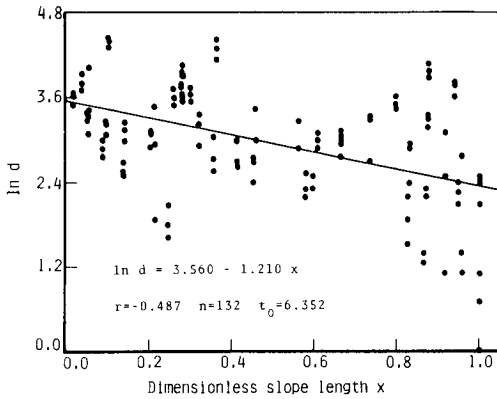


Fig. 6b. Test for the linear trend in the direction of slope (The thickness of surface layer  $d$ ).

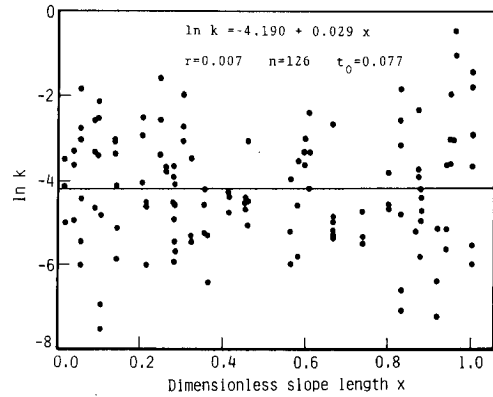


Fig. 6c. Test for the linear trend in the direction of slope (The hydraulic conductivity  $k$ ).

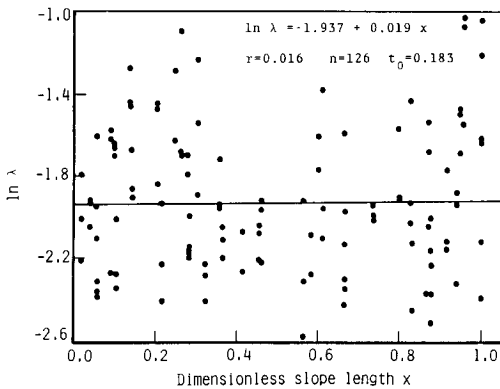


Fig. 6d. Test for the linear trend in the direction of slope (The effective porosity  $\lambda$ ).

そこで、無次元斜面長に対する線形トレンドとしてこの差異の定量化を試みた。

まず、Fig. 4 の各サンプリング地点から河道に至る谷線長を、それを尾根まで延長した谷線長で除し、これを無次元斜面長と定義する。この無次元斜面長と各特性量の自然対数変換値との関係をプロットしたのが Fig. 6 である。同図には、トレンドの有無を検討するために、回帰式、相関係数  $r$ 、サンプル数  $n$  及び (2) 式の  $t$  の実現値  $t_0$  を併記している。Table 4 に示した有意水準  $\alpha=5\%$ 、自由度  $f=n-2$  に対する  $t$  分布の値と比較すると、表層厚にのみ有意な相関が認められ、線形トレンドを考慮しなければならないことが示唆された。

そこで、次に、表層厚の各サンプルの自然対数変換値からこの線形トレンドを除いた残差成分の確率分布の検討を行った。Fig. 7 あるいは Table 5 の  $\chi^2$  検定

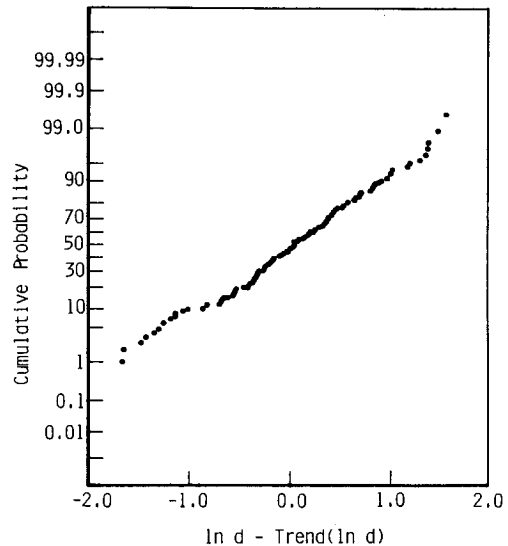


Fig. 7. The residual  $\{\ln d - \text{Trend}(\ln d)\}$  plotted on normal probability paper by Hazen plot.

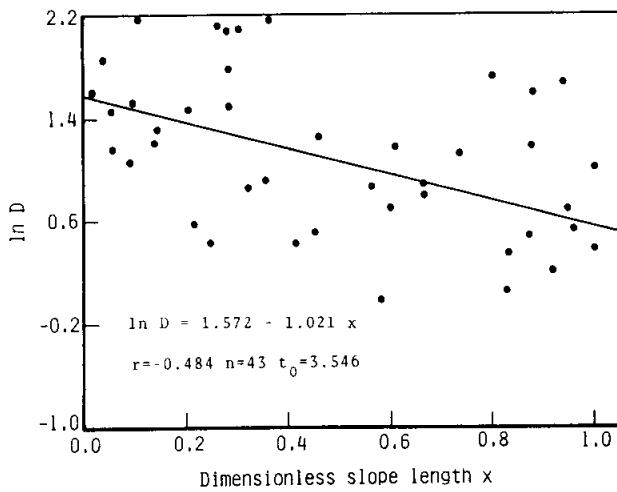
の結果が示すように、正規分布が妥当なモデルとの結論を得た。すなわち、数値シミュレーションにおいて表層厚に乱数を付与する際には、まず決定論的成分として線形トレンドを与え、次に確率論的成分として正規分布に従う残差成分をそれに加えることになる。

#### iv) 実質表層厚 ( $D$ )

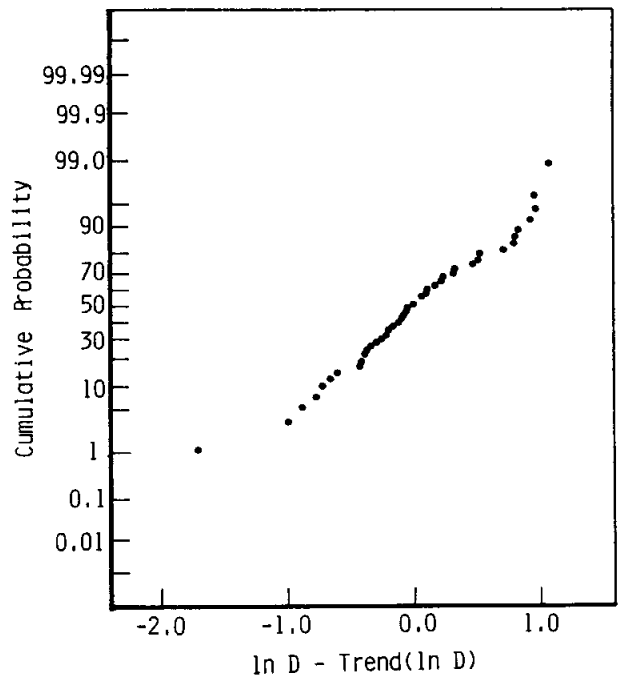
これまで議論の対象としてきた表層厚  $d$  は、見掛けの表層厚であるが、山腹斜面上での側方浸透流と飽和型地表面流の関係を考える場合、表層厚  $d$  の内、有効間ゲキ分だけを考慮した実質表層厚  $D$  も重要となってくる (平松ら, 1985)。すなわち、

**Table 5.** Chi-square test for the residual  $(\ln d - \text{Trend}(\ln d))$ .

Interval	Observed frequency $n_i$	Theoretical frequency $e_i$	$(n_i - e_i)^2 / e_i$
$0.69 \leq$	20	21.9	0.165
$0.36 \leq < 0.69$	20	18.3	0.158
$0.08 \leq < 0.36$	20	20.0	0.000
$-0.17 \leq < 0.08$	20	18.3	0.158
$-0.37 \leq < -0.17$	20	13.6	3.012
$< -0.37$	32	39.9	1.564
	132	132.0	$5.057 < C_{r-\alpha, f} = 7.815$



**Fig. 8.** Test for the linear trend in the direction of slope (The thickness of substantial surface layer  $D$ ).



**Fig. 9.** The residual  $(\ln D - \text{Trend} \{ \ln D \})$  plotted on normal probability paper by Hazen plot.

**Table 6.** Chi-square test for the residual  $(\ln D - \text{Trend}(\ln D))$ .

Interval	Observed frequency $n_i$	Theoretical frequency $e_i$	$(n_i - e_i)^2 / e_i$
$0.75 \leq$	7	4.4	1.536
$0.21 \leq < 0.75$	7	11.2	1.575
$-0.05 \leq < 0.21$	7	7.3	0.012
$-0.21 \leq < -0.05$	7	4.5	1.389
$-0.42 \leq < -0.21$	7	5.3	0.545
$< -0.42$	8	10.3	0.661
	43	43.0	$5.718 < C_{r-\alpha, f} = 7.815$

$$D = \lambda d \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$ は有効間ゲキ率である。

前項までの検討によると、 $\lambda$ も  $d$  も対数正規分布に従い、かつ確率的統計的に独立であつた。一般に、独立な対数正規変量の積も対数正規変量になることが知られており (Ang and Tang, 1975),  $\lambda$  と  $d$  の自然対

数変換値の平均と分散をそれぞれ  $\overline{\ln \lambda}$ ,  $\overline{\ln d}$  および  $\sigma_{\ln \lambda}^2$ ,  $\sigma_{\ln d}^2$  で表わせば、 $D$  の自然対数変換値の平均  $\overline{\ln D}$  と分散  $\sigma_{\ln D}^2$  は次式で求められる。

$$\overline{\ln D} = \overline{\ln \lambda} + \overline{\ln d} \quad (4)$$

$$\sigma_{\ln D}^2 = \sigma_{\ln \lambda}^2 + \sigma_{\ln d}^2 \quad (5)$$

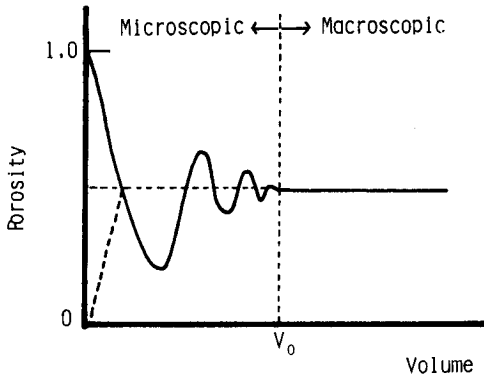


Fig. 10. Volume  $V_0$  is the "representative elementary volume" (after Bear, 1972).

一方, Fig. 8 には, 無次元斜面長に関する線形トレンドの検討結果を示す。 $\ln d$  に線形トレンドが認められたことにより予想されるように,  $\ln D$  にも線形トレンドが見受けられる。また, 線形トレンドを除いた残差成分は, Fig. 9, Table 6 に示すように, 正規分布がよい適合を示した。

## 結 論

山地流域の洪水流現象は, 気象 (降雨), 地形, 地質, 土壌, 植生, 土地利用などの支配要因によつて規定され, 生起している。ところが, これらの内, どの要因を取つても, 流域内で一様かつ均一と見做せるものではなく, このことが現象の物理機構を解明する際の最大の難点となつている。

ところで, ある物理量の空間的分布が一様なのか, 均一なのかを議論する場合, 2種類のスケールが重要な問題となつてくる。

まず, 物理量が測定される個々のサンプルのスケールの問題である。本論文では, 透水係数, 有効間ゲキ率がこれに関係してくる。すなわち, 土壌は, 微細な土粒子の不定形な集合体と, 同じく不定形な間ゲキより構成されている。従つて, Fig. 10 に間ゲキ率を例に概念的に示すように, ある地点で得られるサンプルは, サンプルの体積が小さい領域ではその値が体積によつて細かく変動するが, ある体積  $V_0$  以上になるとほぼ一定となつてくる。Bear (1972) は,  $V_0$  を the representative elementary volume と称し, microscopic と macroscopic の境界を与える体積と定義している。すなわち,  $V_0$  以上のサンプルであれば, 土壌中の水の流れを考える際の基本となる連続体の仮定を満足させるに充分なほど, 土壌構成のパラツキは, 統

Table 7. The stochastic properties of the hillslope parameters.

Parameter	Probability distribution	Mean	Standard deviation
$\ln f$	Normal	1.55	0.634
$\ln d^*$	Normal	2.95	0.812
$\ln d - \text{Trend}\{\ln d\}$	Normal	4.66	0.709
$\ln k^{**}$	Normal	-4.18	1.35
$\ln \lambda^{**}$	Normal	-1.93	0.365
$\ln D^{***}$	Normal	1.02	0.890
$\ln D - \text{Trend}\{\ln D\}$	Normal	5.30	0.593

\* Linear trend Trend  $(\ln d) = 3.56 - 1.21x$

\*\* Correlation coefficient  $r\{\ln k, \ln \lambda\} = 0.739$

\*\*\* Linear trend Trend  $(\ln D) = 1.57 - 1.02x$

計的に平均化されていることになるのである。本論文では  $V_0$  の検証は行っていないが, Darcy 則に従う流れを対象とする場合, 100 cc 定容採土円筒程度のサンプルであれば, このスケールの問題には, 抵触してこないと考える。

次に重要となつてくるのが, サンプリングを行う領域のスケール (広さ) の問題である。これは, 本論文で対象としている4つの特性量すべてに関係してくる。すなわち, 狭い領域では一様 (あるいは均一) であつても, その領域を除々に広げていくと, 一様 (あるいは均一) と見做せなくなる場合があるのである。近年, 面積の小さな流域を対象とし, 集中的に水文観測を行い現象にアプローチしようとする方法論がしばしば見受けられる。これは, 一方で, 小流域では水文観測が容易であるという技術的理由もあるが, やはり, スケールを小さくすることにより, たとえば降雨, 地質, 植生などの要因をほぼ均一, 一様と見做し, 問題の所存を明確にしようとする意図が働いているにほかならない。

著者らも, このような認識により, 試験流域を設け山地小流域を対象とした研究を続けている。本論文は, その一環として, 山地小流域程度のスケールでも一様とは見做しがたい土壌特性について, 著者らが行つている数値シミュレーションを背景として論じたものである。得られた結果を Table 7 にまとめる。

ところで, 本論文では, 各種の棄却検定を行い, 山腹斜面特性量の確率統計的特性を論じた。その際, 1つの基準として有意水準  $\alpha = 5\%$  を採用した。そもそも, このような棄却検定は相対的なものであつて, 有意水準の取り方に大きく依存する。しかし, ここでの検定の目的は, 実流域における山腹斜面特性量の確率統計的特性をできる限り忠実に表現する1つのモデル

を見出すことにあり、絶対的特性を把握しようとして  
いるのではないことを最後に付記しておく。

## 文 献

- Ang, A. H. and W. H. Tang 1975 *Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. 1 Basic Principles*. John Wiley & Sons (U. S. A.)
- Bear, J. 1972 *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York
- Dreibelbis, F. R. 1962 Some aspects of watershed hydrology as determined from soil moisture data. *J. Geophys. Res.*, **67** : 3425-3435
- Freeze, R. A. 1975 A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media. *Water Res. Res.*, **11** : 725-741
- Freeze, R. A. 1980 A stochastic-conceptual analysis of rainfall-runoff processes on a hill-slope. *Water Res. Res.*, **16** : 391-408
- Greenkorn R. A. and D. P. Kessler 1969 Dispersion in heterogeneous nonuniform anisotropic porous media. *Ind. Eng. Chem.*, **61**(9) : 14-32
- 平松和昭・田中宏平・四ヶ所四男美・瀬口昌洋 1985 確率システム論による流出機構の検討. 農業土木学会九州支部シンポジウム論文集 : 35-49
- Jazwinski, A. H. 1970 *Stochastic Processes and Filtering Theory*. Academic Press, New York
- 岸根卓郎 1980 理論応用統計学. 養賢堂, 東京
- 瀬口昌洋・田中宏平・四ヶ所四男美・平松和昭 1986 山腹斜面の洪水流出過程における表層土壌水分の役割について, 第30回水理講演会論文集 : 97-102
- 椎名乾治 1965 畑地カンガイ調査計画法 (その1). 農業土木会誌, **33** : 24-29
- 高棹塚馬 1963 出水現象の生起場とその変化過程. 京都大学防災研究所年報, **6** : 166-180
- 田中宏平・四ヶ所四男美・瀬口昌洋 1982 山地小流域の土壌水分と流出特性. 京都大学防災研究所年報, **25**(B-2) : 195-205

## Summary

Spatial variability of 44 sets of four field-measured hillslope parameters on a small mountainous basin (catchment area 0.095 km<sup>2</sup>) was studied by statistical tests for distribution and correlation coefficient. Of the four parameters, thickness of litter layer and thickness of surface layer were related to generation of overland flow, and hydraulic conductivity and effective porosity to throughflow. Measurements were made at the 44 nodes of a 50 m regular grid.

The results indicated that these parameters were spatially nonuniform and their log-normal distributions were acceptable models at the significant level  $\alpha = 5\%$ . Furthermore, it was found that the thickness of surface layer had a marked linear trend in the direction of slope and that the hydraulic conductivity and the effective porosity were correlated.