

## 石手川上流域（愛媛大学演習林）の 砂防計画について（I）

小川 滋\*・伏見 知道\*・鬼木 幹男\*・高田 興宣\*\*

The Planning of Land Erosion Control on Ehime University Forest (I)

Shigeru OGAWA, Tomomichi FUSHIMI, Mikio ONIKI and Okinobu TAKATA

**Summary :** The Sabo facilities should be planned to control the mass movement which consists of various types of slides, falls and flows.

In this paper, we made a survey of the sediment removal on two small catchments (80-100 ha) in Ehime university forest which is in the upstream part of the Ishite River Basin, Ehime prefecture. Using the results of this survey, we tried to predict the dangerous locations in which mud flow or debris flow might occur.

On the other hand, we planned to build the sediment control dam in order to protect the torrents from disaster danger by sediment removal.

**要 旨** 砂防計画の立案は、土砂の生産・移動の実態把握のための調査解析が、基礎となる。石手川上流域にある愛媛大学演習林における砂防計画立案のために、流域の地形解析、水系網解析によって、地形的特性を明らかにし、溪流調査により、土砂の生産、流送、堆積区域の分類の検討をおこない、土砂移動の危険箇所を推定した。これらは、将来的に、移動の実態を追跡調査する基礎的な資料を与えると共に、調査解析方法の確立を、目的とするものである。

### 1. ま え が き

石手川上流域は、地質的に花崗岩地帯であり、地形は急峻であるため、豪雨のたびに多量の土砂を生産流出しており、中流域にある貯水ダムへの土砂流入が、心配されている。愛媛大学演習林は、この石手川上流域にあるため、このような土砂生産流出の実態を把握し、土砂移動に対する、砂防計画立案の対象地として選定した。

\* 森林工学研究室 Laboratory of Forest Engineering

\*\* 森林工学研究室（現復建調査設計株式会社） Laboratory of Forest Engineering (Present FUKKEN CHOSA SEKKEICO., LTD.)

まず、基礎的な調査解析として、

- 1) 演習林内を小流域に分割して、地形解析や水系網解析などによって、地形的特性を明らかにし、
- 2) 溪流の縦横断測量によって堆砂量、堆砂勾配などを調査し、それらによって、溪床勾配をもとに、
- 3) 溪流における土砂の生産、流出、堆積の区域分類をおこない、土砂移動の形態、および個所を推定し、砂防計画について考察する。

今回の調査対象流域は、2流域で、溪流に堆積した土砂礫の移動、とくに、土石流的な移動を調査解析の対象としており、山腹崩壊などについては、取り上げていない。これは、過去、小規模ではあるが、土石流的な土砂移動が生じた流域であるため、その点についての調査を、重点的におこなったためである。

## 2. 調査流域の概況

調査対象流域は、重信川水系石手川上流域にある愛媛大学演習林、椋皮田流域(82.4ha)および長井田流域(98.6ha)である。高縄山系に属し、標高540~1,000mに位置する山岳林である。年降水量は、2,000mm程度であり、標高、地形の関係によって、いわゆる瀬戸内少雨地域とは、区別される。

地形は、一般に、尾根筋は傾斜が比較的緩であるが、谷筋の近くでは、傾斜が急で、30°以上の急斜地が多い。これら支流より発する石手川は、延長35kmであり、道後平野の「出合」において、重信川と合流し、「今出」で伊予灘に、注いでいる。

対象流域周辺の地質は、中央構造線内帯に属し、地塊は、全般的に単純化しており、花崗岩を基岩としている。これら花崗岩は、領家型の角閃石黒雲母花崗岩である。土壌は、全体的に、褐色森林土で、砂質および壤質土壌であるが、部分的に、急斜地において石礫土、比較的平坦部においては、埴壤土および埴土がみられる。溪流沿いの急斜部においては、砂質の急峻匍行土であり、表層滑落の土壌流亡が、随所にみられる。

## 3. 流域形状および地形特性

流域形状に関する特性値は、表-1に示すようである。形状係数は、0.2~0.3で細長い形状を示しており、日本における流域形状としては、普通である。谷密度は、16~17(km/km<sup>2</sup>)で大流域における値などと比較すると、過大な値を与えているが、これは、図-1に示すように、1/5000地形図上で作成した水系網図において、その水系の全合計長として、谷延長値をもちいたため、通常の谷密度の値とは、異なったものと考えられる。水系模様としては、樹枝状流域で、最も一般的な形状である。しかし、ところによっては、小断層(節理)の方向に従って、谷が分岐しているところもあり、谷の合流角度などの詳細な検討が、必要であるようである。

流域上流部付近では、地形の開析が進み、扇状水系模様でもあるため、出水の集中が生じやすい形状である点は、注意を要するであろう。

概して、地形的には、壮年期~晩壮年期の地形であり、侵食段階も、最も激しさをます時期にあると考えられる。

表-1 流域形状特性値

	椋皮田	長井田
流域面積 (A)	823750m <sup>2</sup>	986500m <sup>2</sup>
流域周囲長 (P)	4740m	5940m
本流の長さ (L)	1860m	2454m
流域平均幅 (B)	443m	402m
形状係数 (B/L)	0.24	0.16
流域最大辺長 (L <sub>0</sub> )	1650m	2150m
流域平均幅 (B <sub>0</sub> ) [B <sub>0</sub> =A/L <sub>0</sub> ]	499m	459m
形状係数 (B <sub>0</sub> /L <sub>0</sub> )	0.30	0.21
円状率 $\left(\frac{4\pi A}{P^2}\right)$	0.46	0.35
細長率 $\left(2\sqrt{\frac{A}{L_0}}\right)$	0.62	0.52
谷密度 (km/km <sup>2</sup> )	17.0	16.1

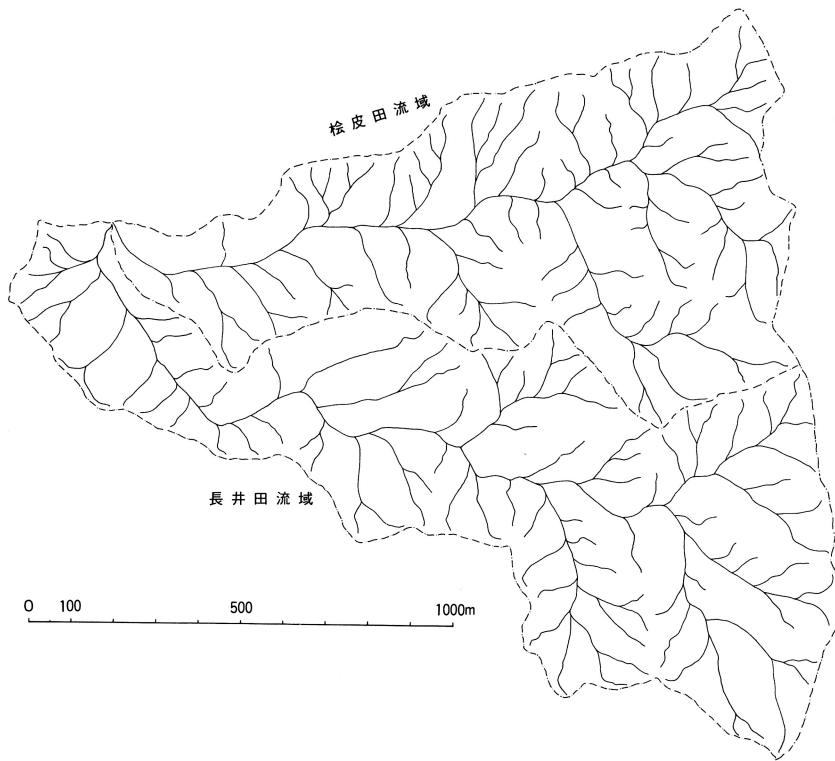


図-1 水系網図

#### 4. 水系網解析

図-1に示すように、1/5000地形図上で水系網を作成し、Stralher方式の次数区分をおこなった。水系網は、とくに、小さな「山ひだ」までを、水系として入れている。椋皮田、長井田流域とも、最高次数4次で、細長い流域の中央を、4次水流が流れている。

椋皮田、長井田流域における水系網解析の結果は、表-2のようであり、それぞれ図-2、図-3に示すようである。両流域とも、水流次数( $\omega$ )と数( $N_\omega$ )、 $\omega$ と勾配( $\bar{S}_\omega$ )の関係についてのHorton則は、ほぼ満足しているようである。 $\omega$ と面積( $\bar{A}_\omega$ )、 $\omega$ と水流の長さ( $\bar{L}_\omega$ )については、3次までの傾向線から、4次で離れるようになる。

流域形状の項でものべたように、最上流部付近の4次谷に集中した雨水が、流域末端まで、流下するという流域特性を、示すものである。

つぎに、分岐比( $e^b$ )、谷長比( $e^d$ )、面積比( $e^f$ )について、一般にいわれている、地質上の制約が少なく、ランダム性の強い水系網における値、 $e^b=4$ 、 $e^d=1/2$ 、 $e^f=1/4$  と対比させると、分岐比については、両流域とも、1次、2次、3次、4次を通じて極端な違いはないが、面積比は、3次と4次の比、谷長比は、1次と2次の比、3次と4次の比が、異常値的な性格をもつものと考えられる。

これらを考えると、本流域は、かなりの地質構造上の制約、あるいは、現侵食段階における何らかの要因が、働いているように考えられる。また、侵食に関して、最も関連深いと考えられる、 $\omega$ と勾配( $\bar{S}_\omega$ )の関係は、Horton則が認められるようである。

谷の縦断形については、勾配と水流長が関係する。Yang<sup>1)</sup>によると、動的に平衡状態に達しておれば、各水流次数間での、単位質量あたりのエネルギーが、等しくなければならないということから、各水流次数区間の平均落差

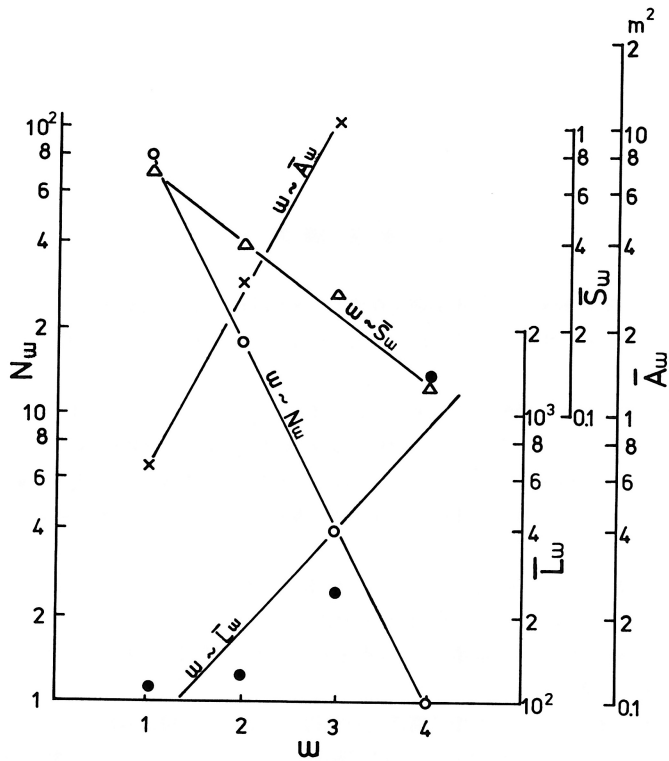
表一2 水系網解析

絵皮田流域

次数	数	谷延長	谷平均長 ( $\bar{L}_\omega$ )	平均谷勾配 ( $\bar{S}_\omega$ )	平均面積 ( $\bar{A}_\omega$ )	分岐比 ( $e^b$ )	谷長比 ( $e^l$ )	面積比 ( $e^a$ )	谷勾配比 ( $e^h$ )	落差比 ( $e^d, e^H$ )
1次	81	9422 m	116m	0.69	0.66m <sup>2</sup>	4.5	0.94	0.23	1.77	1.66
2次	18	2213	123	0.39	2.89	4.5	0.50	0.28	1.44	0.72
3次	4	992	248	0.27	10.18	4.0	0.18	1.2 × 10 <sup>-5</sup>	2.08	0.37
4次	1	1397	1397	0.13	823750					
平均						4.3	0.54	0.17	1.76	0.92

長井田流域

次数	数	谷延長	谷平均長 ( $\bar{L}_\omega$ )	平均谷勾配 ( $\bar{S}_\omega$ )	平均面積 ( $\bar{A}_\omega$ )	分岐比 ( $e^b$ )	谷長比 ( $e^l$ )	面積比 ( $e^a$ )	谷勾配比 ( $e^h$ )	落差比 ( $e^d, e^H$ )
1次	87	10364m	119m	0.65	0.74m <sup>2</sup>	4.6	0.84	0.22	1.81	1.55
2次	19	2685	141	0.36	3.34	4.8	0.61	0.27	1.89	1.15
3次	4	931	233	0.19	12.43	4.0	0.12	1.2 × 10 <sup>-5</sup>	1.58	0.19
4次	1	1932	1932	0.12	986500					
平均						4.5	0.52	0.16	1.76	0.96



図一2  $\omega$  と  $N_\omega, \bar{L}_\omega, \bar{S}_\omega, \bar{A}_\omega$  との関係 (絵皮田流域)



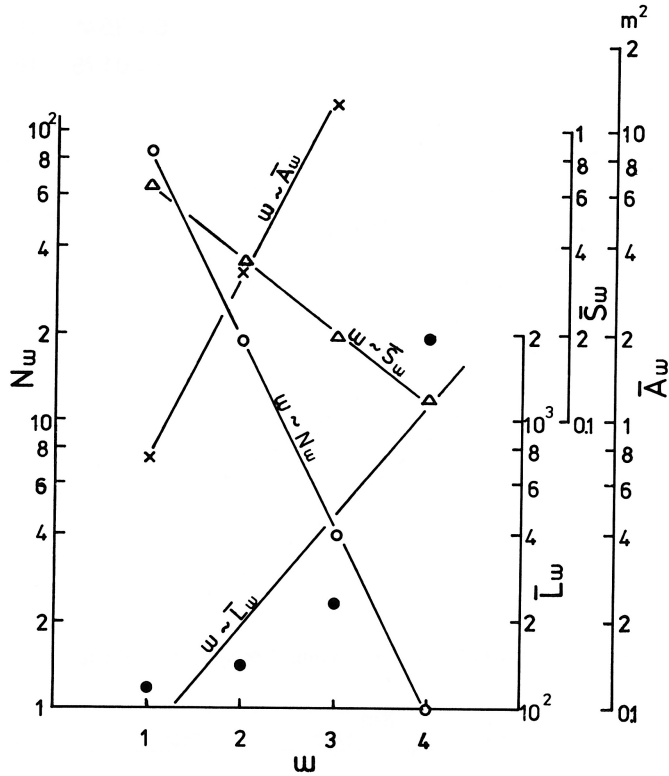


図-3  $\omega$  と  $N_\omega, \bar{L}_\omega, \bar{S}_\omega, \bar{A}_\omega$  との関係 (長井田流域)

( $\bar{Z}_\omega$ ) が、等しいことを導き、 $\bar{Z}_\omega/\bar{Z}_{\omega+1}=1$ , すなわち、 $e^D \times e^H=1$  を導いている。本流域においては、表-2 に示すように、落差比 ( $e^D \cdot e^H$ ) は、平均値としては、0.9 程度であるが、各次数間の落差比をみると、等落差とはいえないようである。

ここで、Horton の第 2 則 (谷長則)、第 3 則 (勾配則) が成立するとすれば、次式が成りたつ。

$$\log_e \bar{L}_\omega = C - D \cdot \omega \quad (\text{第 2 則}) \quad (1)$$

$$\log_e \bar{S}_\omega = G - H \cdot \omega \quad (\text{第 3 則}) \quad (2)$$

ここで、 $C, D, G, H$  は定数

これより、1 次水流上流端から、任意の  $m$  次水流の最下流端までの落差を、 $Y_m$  とすれば、 $Y_m$  は、

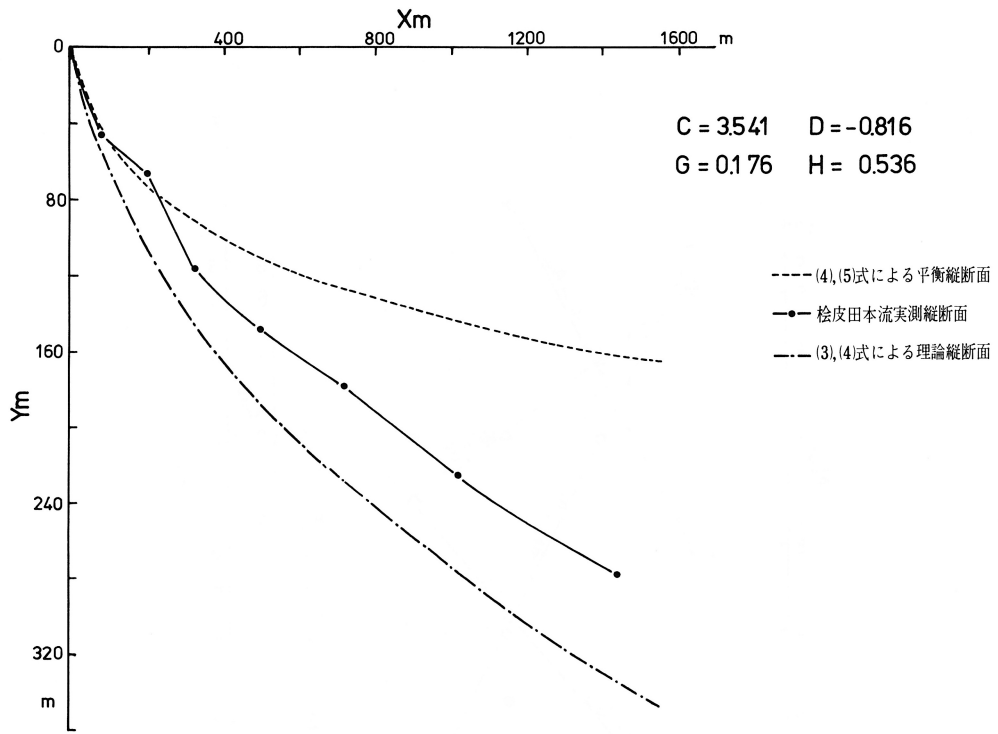
$$Y_m = \sum_{\omega=1}^m \bar{Z}_\omega = e^{(C+G)} \sum_{\omega=1}^m e^{-(D+H)\omega} \quad (3)$$

であらわされる。また、上流端からの水平距離  $X_m$  は、次式で与えられる。

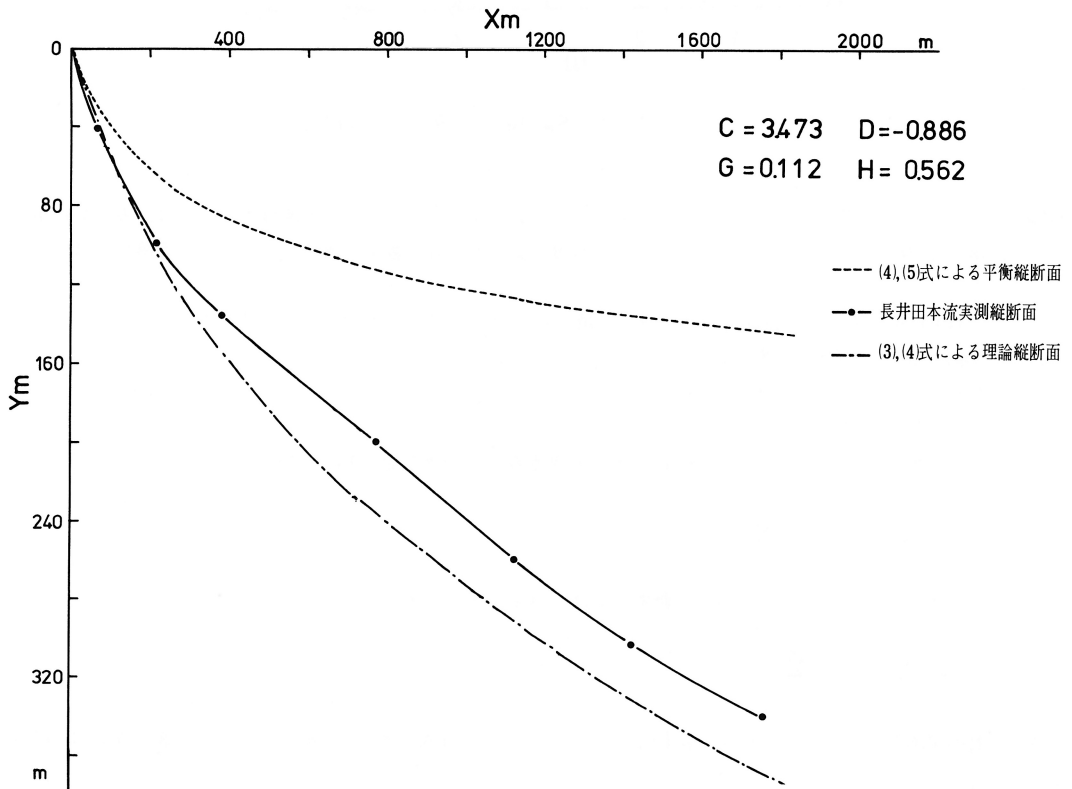
$$X_m = \sum_{\omega=1}^m \bar{L}_\omega = e^C \sum_{\omega=1}^m e^{-D\omega} \quad (4)$$

さて、動的平衡状態であるとするれば、落差比 1 であることから、平衡状態での  $m$  次水流までの落差  $Y'_m$  は、 $e^D \times e^H=1$  より、

$$Y'_m = m e^{(C+G)} \quad (5)$$



図一四 溪床縦断面の実測値と Yang の理論値（椋皮田流域）



図一五 溪床縦断面の実測値と Yang の理論値（長井田流域）

で与えられることになる。

これらを利用すれば、平衡状態に対する、現在の谷の縦断形状の発達段階を、示すことができるわけである。

本流域において、以上の処理をおこなった結果を、図-4、図-5に示す。第2則については、図-2でもわかるように、Horton則の成立が満足でないため、平衡曲線の意味が十分ではないけれども、一応の傾向としては、この平衡曲線に対して、とくに、3次以降に、侵食の異常に進んだ状態があるといえよう。しかしながら、動的平衡について、このような小流域での解析例は少なく、さらに、ここにおける1次谷は、常時水流が生じていないものもあるため、上述の議論が、本流域でできるか否か、今後の問題として検討を加えたい。

### 5. 溪床の区分と土砂移動形態の推定

溪流の縦横断測量の結果より、算定された堆砂量の平面図は、図-6に示すようである。また、溪流別の堆砂量は、表-3のようである。溪床の縦断面図については、椴皮田本流（図-7）、長井田本流（図-8）のみを示すことにする。

表-3 堆積土砂量

溪流	堆積土砂量(m <sup>3</sup> )
椴皮田本流	8,700
トト谷	800
センチガ谷	2,000
キジゴヤ	300
小計	11,800
長井田本流	18,600
ウマガタオ	600
スズ谷本流	700
ナカギリ	300
タカザコ	700
ロクザエモン谷	1,000
ロクザエモン支流	300
カナメ谷	2,500
小計	24,700
合計	36,500

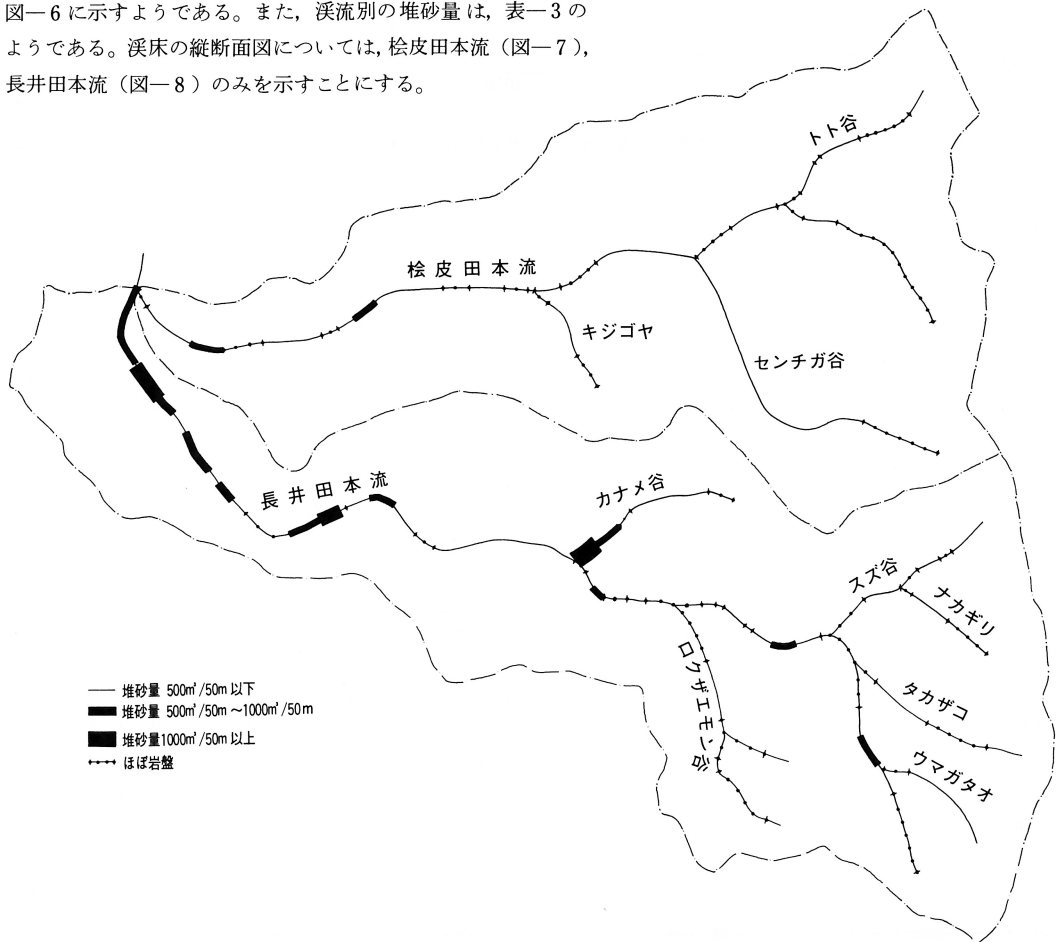
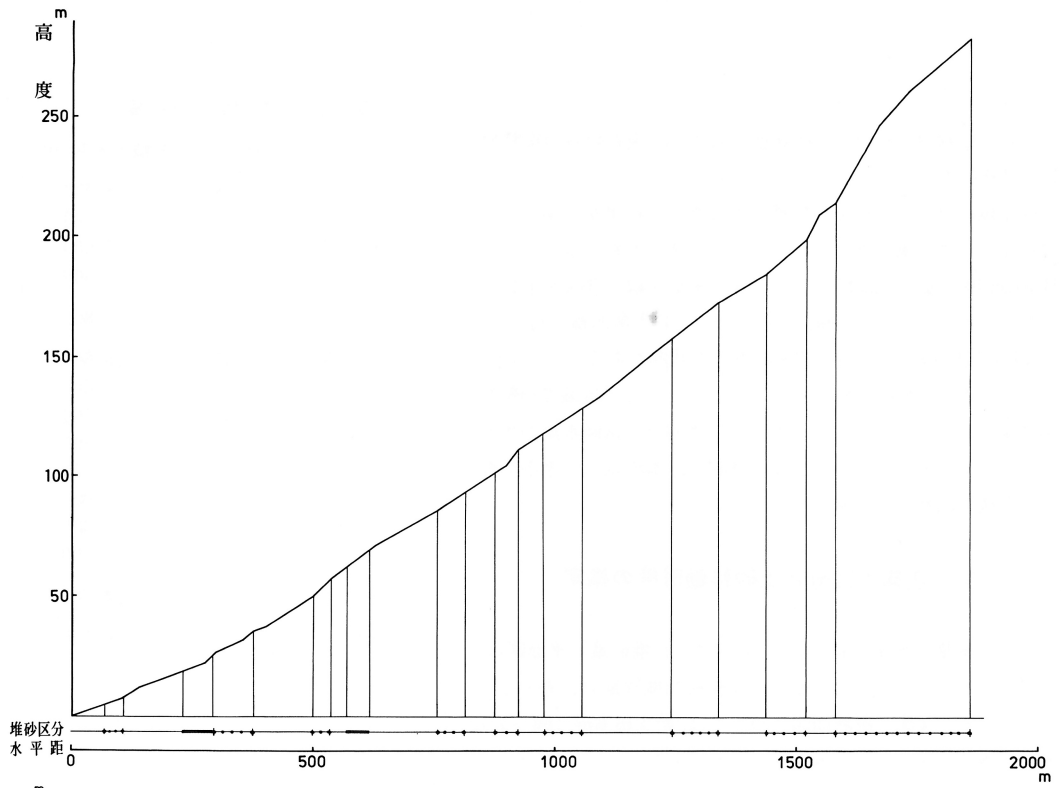
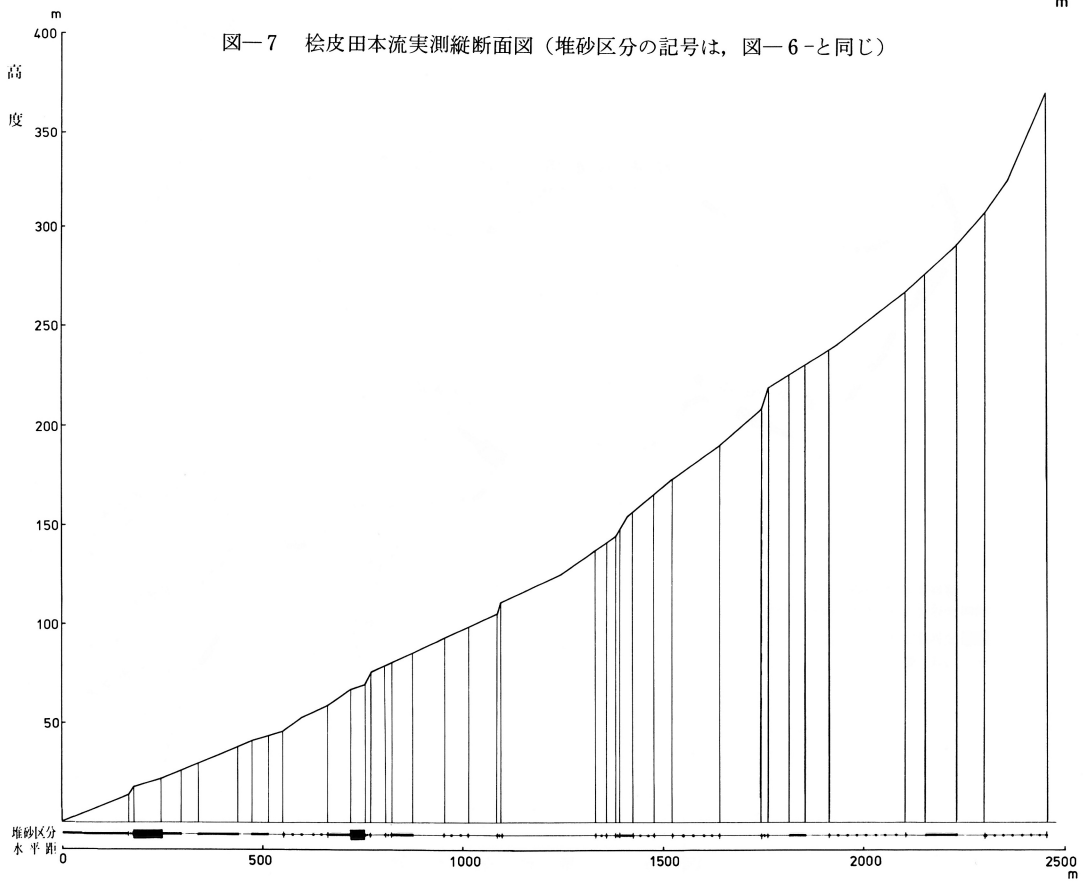


図-6 堆砂量区分



図一七 椴皮田本流実測縦断面図（堆砂区分の記号は、図一六と同じ）



図一八 長井田本流実測縦断面図（堆砂区分の記号は、図一六と同じ）

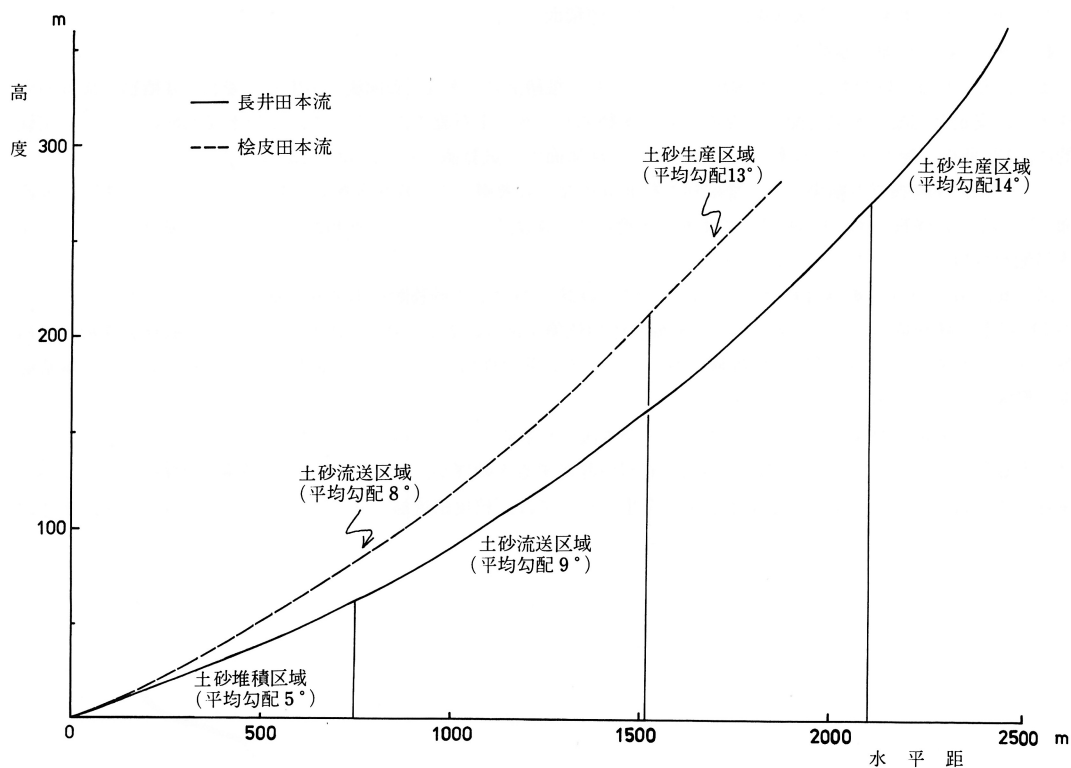


図-9 指数曲線近似による溪流の区分

溪流の全体的な区分をおこなうために、それぞれ本流について、縦断面の実測値をもとに、最小2乗法で、指数曲線に近似させたものが、図-9である。なお、図-9は、比較のため合流点を、原点として書きなおしている。

堆砂量は、長井田本流に多く、とくに下流部に集中している。これは、昭和47年の豪雨によって、上流より流下してきた土砂である。指数曲線の形状からみると、椴皮田流域では、土砂生産区域（平均勾配13°）、土砂流送区域（平均勾配8°）に、区分できるであろう。長井田流域では、土砂生産、土砂流送、土砂堆積の区域に、分けられるようであり、それぞれ、平均勾配14°、9°、5°である。これらは、大まかな分類であり、土砂生産区域すべてにおいて、土砂生産（山崩れ、ガリ侵食など）が、生じているといった意味ではない。

現実的には、図-6、図-7、図-8をみても、わかるように、侵食、堆積がくりかえされており、これらが、長期的には、下流へと土砂の流下を、おこなうものと考えられる。これは、中小出水時において、渓床に存在する土砂が、掃流形式や、移動距離の短い小規模な土石流形式によって、移動するものであり、少なくとも、年に2~3回は、生起するものと考えてよいであろう。

これら、侵食、運搬、堆積の相互作用によって、通常の出水では、直接、下流まで土砂が大量に移動することが、防止されており、いわば、自然抑止力と考えられるべきものである。しかし、自然状態での、中小土石流の堆積区間、あるいは、直接、山崩れによる流路のせき止め区間などで、堆積勾配の急な部分が生じると、大土石流発生の危険性が增大する。

このように、溪流においては、侵食、運搬、堆積のくりかえし作用によって、渓床勾配が形成されており、この渓床勾配の形成について、竹下<sup>2)</sup>は、次のように分類している。

- 1) 0°~6°；水流によって、ふるい分けをうけた細砂の堆積面
- 2) 5°~13°；礫質の水流積面

3) 10°~23°; 水流による淘汰を、うけていない運積面

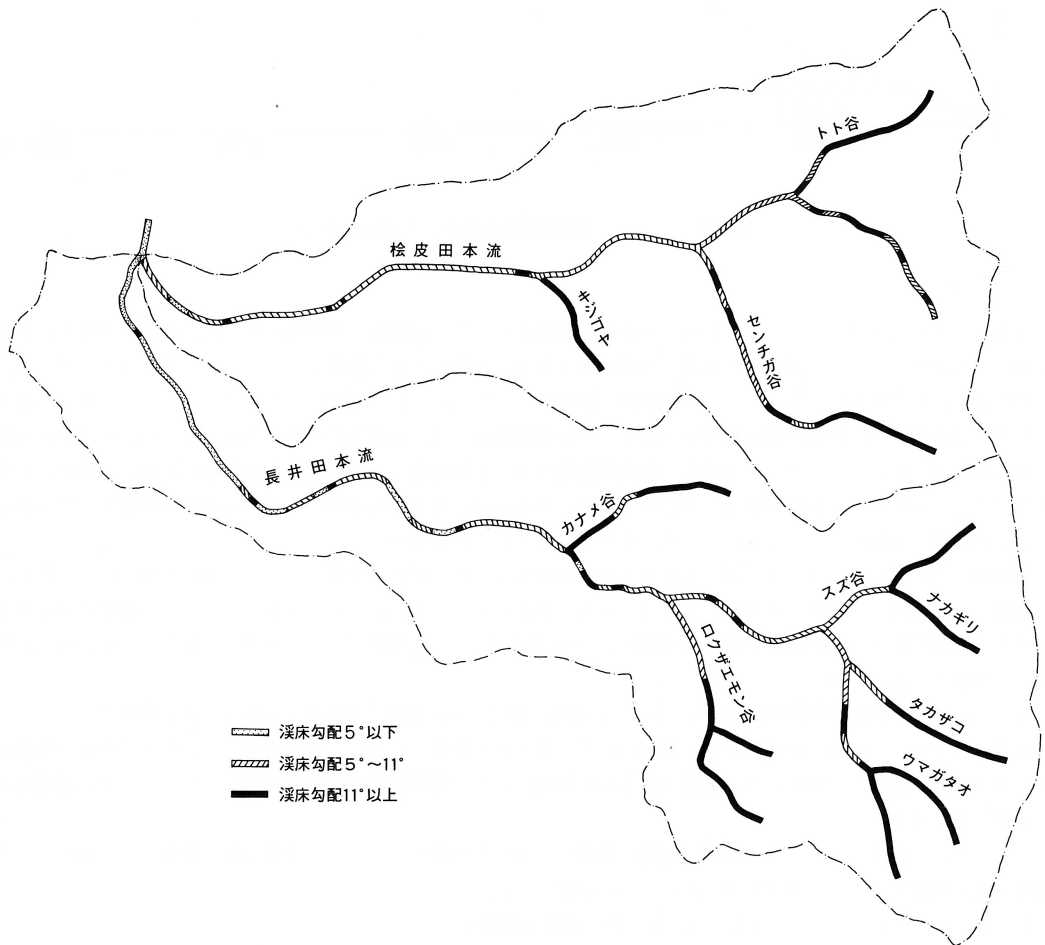
4) 20°~40°; 斜面の崩積層

また、大同<sup>3)</sup>は、3)の水流による淘汰をうけていない堆積面に、水流(表面流)が生じた場合、堆積物が流れの条件下で、安定な勾配(水成勾配)になるために流動するのが、土石流であるとして、この水成勾配について、実験的に、13°前後、静力学的な河床の安定条件より、河床面での試算値として、13°—15°をえている。

ここでは、溪流調査の結果から、堆積物の粒度分布なども考慮して、溪床勾配の分類を、5°以下を、細砂の堆積面、5°~11°を、礫質の水流積面、11°以上を、水流による淘汰をうけていない運積面とした。この基準によって、溪床勾配を分類したものが、図—10である。

図—6、図—10を、組み合わせることによって、溪床における土砂移動の形態を、推定できる。すなわち、上流の11°以上の堆砂量の多いところでは、土石流発生の危険があり、また、中小の出水によって、土砂移動を起す供給源であり、それらが、5°—11°の中流域において、ふるい分け作用をうけながら流下し、下流部の5°以下の堆積面を、形成していると考えてよいであろう。

ここで、土石流の発生危険地点として、長井田本流「上流部」、**「カナメ谷」**があげられる。とくに、「カナメ谷」は、林道開設によって、大粒径(1m前後)の岩石の混在する土砂礫が、平均勾配17°で、多量に堆積しているため、注意をする必要がある。また、中小土石流の発生については、**「トト谷」**、**「センチガ谷」**上流、長井田



図—10 溪床勾配の区分

流域では、「ウマガタオ」上流、「タカザコ」、「ロクザエモン谷」上流があげられる。これらは、大土石流となって、下流へ被害をおよぼすということは、ないと考えられるが、これらが複合すれば、かなり下流まで流下するものと考えられる。

また、流送地域においても、局部的には、11°以上の運積面もあり、この部分において、堆積が進行することがあれば、将来的には、危険地点となる。

流送区域は、一応、順次粒径に応じて、水成勾配が、形成されているようである。桧皮田流域においては、前にものべたように、長井田流域との合流点まで、流送区域である。長井田流域では、5°以下の堆積面が存在し、上流よりの流送土砂は、ここで堆積するものと考えられるが、平常時においては、さらに、2次的な侵食として、下流へと流送される、細砂の供給源ともなる。

以上の土砂移動についての、考察の結果から、今回の調査解析流域の、砂防的な計画の緊急度からいけば、長井田流域における長井田本流の「下流部」の堆積面の固定が、考えられるであろう。これは、上流からの土砂流送に対しても、貯砂する砂防ダムとすべきであろう。さらに、このダムによって、上流で発生した土石流も、この堆積面で、エネルギーを減殺させる機能を有すると同時に、今後の林道開設にともなう、土砂の流下に対する、予防的措置とも考えられるであろう。

## 6. む す び

今回の調査対象流域は、演習林においては、砂防的に安定していると、いわれているところであり、この調査解析によって、とくに、一般の調査解析例と異なった、顕著な問題点を、提起するにはいたらなかった。一応の砂防調査、解析に対する、方針と計画の考え方について、のべたつもりである。これらについては、今後、他の流域の調査解析が進むにつれて、次第に、明らかになってくることと思われる。また、豪雨による大規模な土砂礫の移動が生じ、渓床変動が起これば、その研究の基礎的な資料として、利用できるものとする。さらに、このような、小流域から大流域へ、砂防という面からの展開を、どのようにおこなっていくかも、今後の問題であろう。

最後に、本研究をおこなうにあたって、溪流調査に御協力頂いた、愛媛大学演習林、米野々事務所の職員の方々、ならびに、地形計測、図表作成を手伝って頂いた、武田和事務員に、深く感謝の意を表します。なお、本研究の一部は、52年度文部省科学研究費（自然災害科学研究）によった。

## 引 用 文 献

- 1) Yang, C. T.: Potential energy and stream morphology. W. R. R. 7: 311-322, 1971
- 2) 竹下敬司: 地形的災害と斜面の微地形に関する森林立地学的研究. 福岡県林業試験場時報: 1-49, 1961
- 3) 大同淳之: 堆積物の流動による土石流発生の危険度判定法の一試案. 第10回災害科学総合シンポジウム講演論文集: 155-158, 1973

(1977年8月31日受理)