

# 斜面崩壊発生条件の地形学的解析

## —静岡県下田市周辺について—

### Geomorphological Analysis on the Occurrence Factors of Slope Failure around Shimoda City, Shizuoka Prefecture

笹原 克夫\* 綱木 亮介\*

Katsuo SASAHARA Ryosuke TSUNAKI

#### Abstract

In order to estimate the influence of geomorphological factors to the occurrence of slope failure, geomorphological classification of head hollow slopes and comparison between geomorphological factors of collapsed slope and that of non-collapsed slope is done in the Ochiai river basin (Shimoda City, Shizuoka Prefecture) where many slope failures occurred in September, 1991.

Firstly, by gradient change lines of slopes, head hollow slopes of the area are classified into three categories: gentle slope on the ridge top, valley side steep slope, head hollow bottom surface. In the collapsed slope, collapse generally occurred in the lowest part of valley side steep slope just above gradient change line of the slope.

Secondly, some geomorphological factors are confirmed to be important to the occurrence of slope failure. These are, 1) valley side steep slope gradient, 2) difference of gradient between valley side slope and head hollow bottom surface, and 3) curvature of contour. In regard to collapsed area, negative correlation on logarithmic scale between  $W_M/W_E$  and  $A_F/A_B$ , is clearly confirmed ( $W_M$ : maximum width of the catchment basin,  $W_E$ : width at the end of the catchment of basin,  $A_F$ : collapsed area,  $A_B$ : catchment area).

キーワード: 表層崩壊, 微地形分類\*, 谷頭, 崩壊位置\*, 崩壊規模\*

## 1. はじめに

斜面崩壊発生位置の予測手法は現在までに以下の3種類の手法が提案されている。

① 崩壊発生斜面の地形的・地質的特徴を抽出してそれらを崩壊発生要因とし、点数制やファジー理論により斜面の崩壊発生危険度を定量的に表現する方法<sup>1)2)</sup>。

② 斜面の地形計測値を組み合わせて崩壊発生指標を作り、その指標値により崩壊発生・非発生を判別しようとする方法<sup>3)</sup>。

③ 浸透モデルと安定解析を組み合わせて、斜面の崩壊発生・非発生を物理的に算出する方法<sup>4)</sup>。

このうち①や②の方法については崩壊発生に関与する要因の選択が非常に重要であると考えられる。しかしこれらの要因についての検討は十分なされたとはいえない。特に近年の地形学の成果が十分に反映されていない。つまり①や②などの既存の崩壊発生危険度評価手法<sup>1)2)</sup>は斜面を地形の最小単位として扱っているのに対し、地形学の分野では斜面をさらに微地形に分割した議論を行っ

ている<sup>5)</sup>。それらの成果として小・微地形レベルでの崩壊斜面の特徴が判明している。

そこで本報文では斜面の小地形・微地形レベルの視点から、斜面崩壊の多発した災害事例において、崩壊発生斜面と非崩壊斜面の比較を行うことにより崩壊発生に関与する地形要因の抽出を試みた。

## 2. 調査方法

### 2.1 対象範囲

平成3年9月11～12日に集中豪雨により山腹崩壊が多発した静岡県下田市落合川流域の2渓流を対象とした(図-1)。この災害の概要については既に報告している<sup>7)</sup>。

### 2.2 空中写真撮影及び図化

地形要因の計測及び解析は、災害発生10ヶ月後の平成5年6月に撮影された空中写真(縮尺1/8,000)を図化した、縮尺1/2,000の地形図を使用した。この地形図は1/5,000森林基本図では表現されていない、隣接する崩壊地との間の尾根の地形を表現し得る精度を有する。中山沢左岸側尾根の最下流部についての地形図を図-2に示

\* 建設省土木研究所

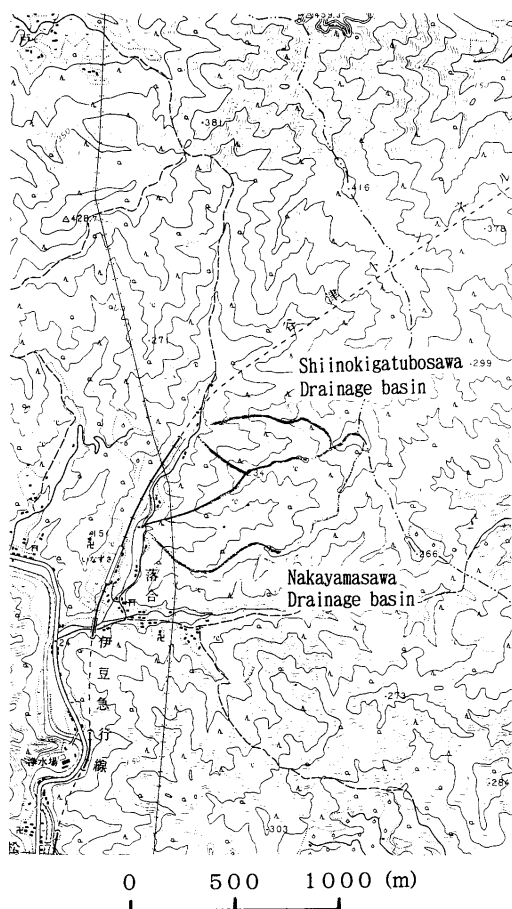


図-1 調査対象渓流

Fig. 1 Map around the survey drainage basins

した。図化範囲は先に調査対象とした2渓流を含むが、両渓流とも最上流部は含まれていない。図化範囲の大きさはおよそ1km×1kmである。

### 2.3 微地形分類

空中写真判読及び現地調査により図-2の範囲で山腹斜面の微地形分類を行った。傾斜変換線は1/8,000空中写真の判読と谷頭斜面の簡易測量により識別し、それらによって斜面の微地形を分類した。

### 2.4 崩壊に関与する地形要因の検討

崩壊斜面と非崩壊斜面の地形計測値を比較し、崩壊発生及びその規模に関与する地形要因を抽出した。

## 3. 山腹斜面の微地形分類と崩壊発生位置

図-2の範囲の山腹斜面の微地形分類の結果を図-3に示す。微地形分類については基本的には田村<sup>9)</sup>の分類に従い山腹斜面を頂部斜面・上部谷壁斜面・下部谷壁斜面・谷頭凹地に分類するが、本地域では谷頭部の発達が著しいので、上部谷壁斜面と谷頭凹地の間に谷頭急斜



図-2 中山沢左岸尾根の地形

Fig. 2 Topography of the ridge locating left side of Nakayamasawa basin

面・谷頭緩斜面<sup>6)</sup>という微地形単位を入れることとする。谷頭凹地の周囲には谷頭急斜面が著しく発達し、また尾根最下流部付近では谷頭緩斜面も広がっている。また流域内で最も傾斜が急であるのは下部谷壁斜面ではなく、谷頭急斜面である。

次に崩壊発生位置については、下部谷壁斜面で発生したものもいくつかあるが、ほとんどが谷頭斜面内の谷頭急斜面最下部(遷緩線直上)で発生した。これは従来の崩壊発生位置に関する知見<sup>5)8)</sup>とは異なる事実であり、当地域での現在最も侵食の活発な部位は谷頭急斜面であることを示すと考えられる。

## 4. 崩壊の発生と規模に関する地形要因の検討

### 4.1 解析単位斜面の設定

地形図を用いた解析をするためにまず山腹斜面を解析のための単位斜面に分割する必要がある。

山腹崩壊、特に表層崩壊の発生には表層土層中の地下水が最大の誘因となっている。よってここでは1/8,000空中写真または1/2,000地形図で確認する微小な尾根で区切られた集水域を解析の単位斜面とする。図-2では山腹斜面を単位斜面に分割している。

解析範囲全体について見ると、複数の集水域にまた

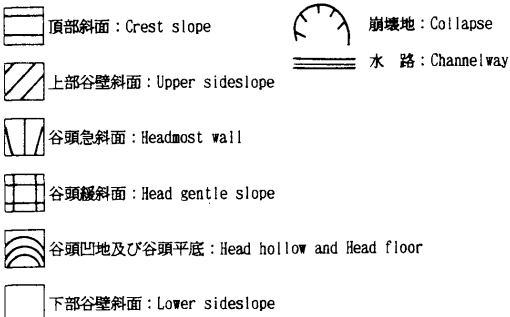
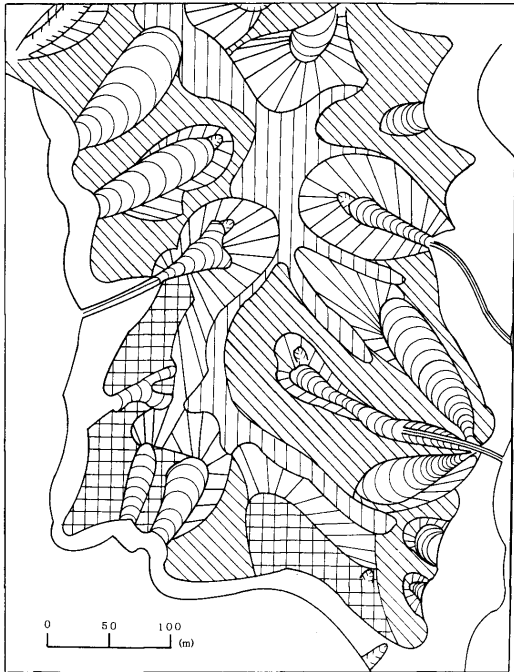


図-3 中山沢左岸尾根の微地形分類図

Fig. 3 Geomorphological Map of the Left Side Ridge of Nakayamasawa Basin

がって発生した大規模崩壊が1箇所ある他は、一つの集水地形の中に一つの山腹崩壊が発生している。よって上述の定義の集水域は、表層崩壊の発生に関する単位斜面であるといえる。

また前節の結果より、地形要因解析における非崩壊斜面の崩壊に関与する集水域の基準点は、谷頭急斜面最下部の遷緩線上に設置することとする。

以上のようにして、1/2,000地形図上で中山沢と椎ノ木ヶ坪沢について、解析のための単位斜面を設定した。解析対象の単位斜面の数は各々36と19で、そのうち各々20と11が崩壊斜面の数である。

#### 4.2 崩壊発生に関する地形要因の検討

崩壊発生に関する地形要因として、以下の項目に関して検討する。

##### ① 斜面勾配

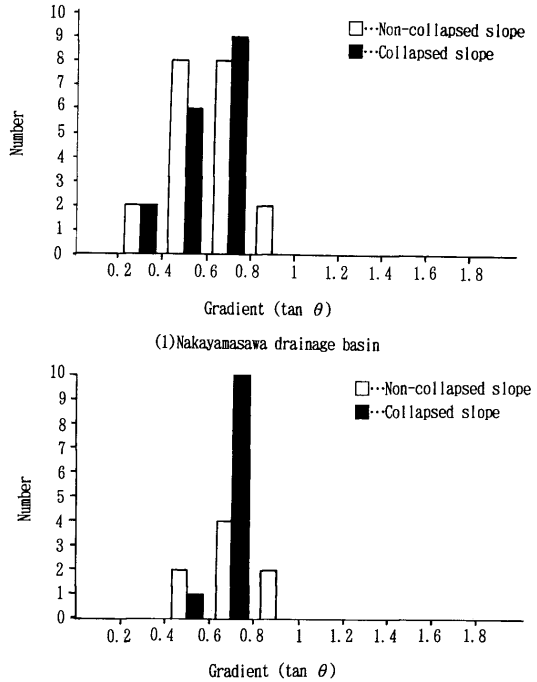


図-4 崩壊斜面と非崩壊斜面の平均勾配の比較

Fig. 4 Comparison between the average gradient of the collapsed slope and the Non-collapsed slope

図-4に崩壊斜面と非崩壊斜面の平均勾配(流心線沿いの集水域の最高部と最低部の平均勾配)の分布を比較した。これを見ると崩壊斜面と非崩壊斜面とで、特にはっきりした分布の差異は認められない。

斜面内で崩壊が発生しているのは、基本的には谷頭急斜面であることから谷頭急斜面の勾配について考える。図-5に崩壊斜面と非崩壊斜面の谷頭急斜面勾配の分布を比較した。崩壊斜面の勾配が、非崩壊斜面より大きな方に分布する傾向が認められる。

よって従来のように<sup>1)</sup>斜面の平均勾配を考えるよりも、斜面中の微地形(谷頭急斜面)の勾配を見る方が崩壊斜面と非崩壊斜面の差異がはっきりするといえる。

##### ② 谷頭急斜面と水路部の勾配差

表層土層中の地下水の運動をダルシー則に従って考えると、斜面中の勾配の変化がその点での地下水位に影響を与えることが容易に理解できる。また、下部勾配を一定にして、上部斜面勾配を変化させた時の勾配変化点付近の地下水位について検討した研究事例<sup>9)</sup>もある。斜面内の地下水位は有効(垂直)応力を減少させ、崩壊発生の大きな要因となることから、斜面内の勾配変化の重要性が認識できる。よってここでも、崩壊斜面と非崩壊斜面における流心線上での谷頭急斜面と谷頭底地・水路部の勾配差の分布の差異について検討した(図-6)。

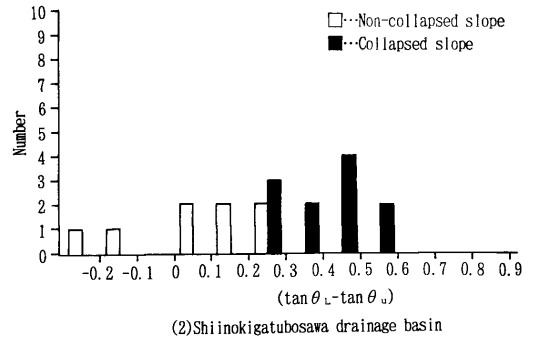
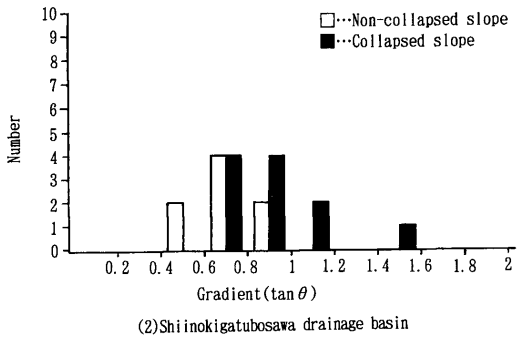
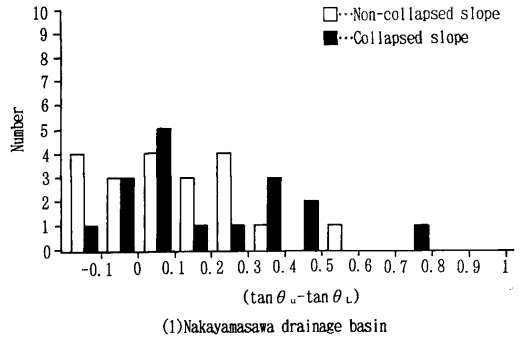
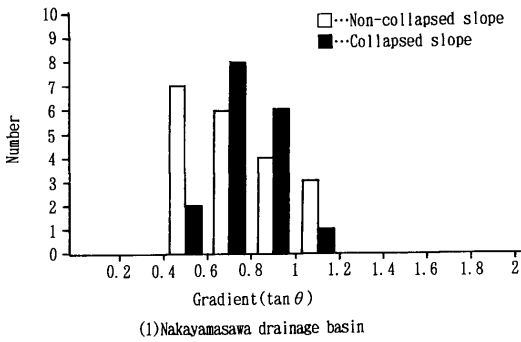


図-5 崩壊斜面と非崩壊斜面の谷頭急斜面勾配の比較

Fig. 5 Comparison between the steep valley side slope gradient of the collapsed slope and that of the Non-collapsed slope

中山沢でははっきりとした差異はないものの、崩壊斜面の方が勾配差が大きな範囲の個数が多い傾向がある。また椎ノ木ヶ坪沢では0.2~0.3の値を境に非崩壊斜面は値の小さい範囲に、崩壊斜面は大きい範囲に勾配差の値が分布している。よって当地域においては崩壊斜面の方が非崩壊斜面より谷頭急斜面と谷頭底地・水路部の勾配差が大きい傾向が確認され、その傾向は谷頭急斜面勾配を見たときより顕著になっているといえる。

③ 等高線曲率

斜面の横断形状が斜面下地の地下水位に影響を与えることも容易に想定される。横断形状を同心円状の等高線の曲率として与えた場合の斜面下地の地下水位に関する理論的検討<sup>10)11)</sup>も行われている。

既往の研究事例では等高線の形状を円形に近似していたが、sinカーブに近似する方がより現実の等高線の形状に近いと考えられる。等高線曲率  $a$  は等高線を表す式を

$$y = a \cdot \sin x \dots\dots\dots(1)$$

とすると、以下の式で求められる (図-7)。

$$a = \pi \cdot \left( \frac{y}{x} \right) \dots\dots\dots(2)$$

図-6 崩壊斜面と非崩壊斜面の谷頭急斜面勾配と谷頭底地の勾配差の比較

Fig. 6 Comparison between  $(\tan \theta_u - \tan \theta_L)$  of the collapsed slope and that of non-collapsed slope

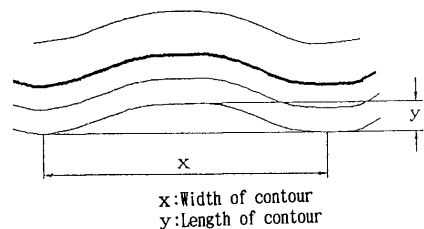


図-7 等高線の形状

Fig. 7 Shape of contour

ここで  $x$  は等高線の幅、 $y$  は等高線の奥行きとする。

このようにして崩壊斜面と非崩壊斜面の、谷頭急斜面最下部の遷緩線上での等高線曲率  $a$  を求め、その分布を比較したのが図-8である。

崩壊斜面の等高線曲率の分布範囲が非崩壊斜面のそれより大きな方に偏っている傾向が認められる。斜面の横断形状として考えると、崩壊斜面の方が谷形状が顕著である傾向があるといえる。

⑤ 集水面積-谷頭急斜面勾配

羽田野<sup>3)</sup>は昭和47年7月豪雨により天草上島に発生した崩壊について以下の関係を確認した。発生した崩壊

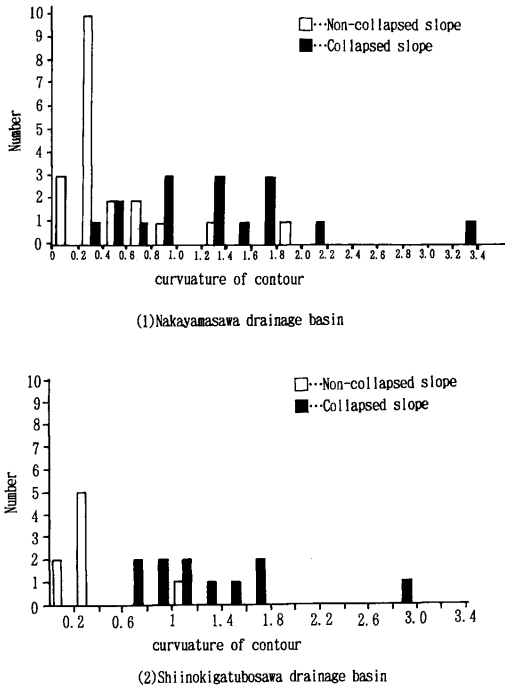


図-8 崩壊斜面と非崩壊斜面の等高線曲率の比較

Fig. 8 Comparison between a curvature of contour of the collapsed slope and that of non-collapsed slope

源の平均傾斜  $\theta$  の正接  $S = \tan \theta$  と崩壊源下端における集水域平均奥行き  $a$  (集水面積  $A$  を崩壊地下端幅  $W$  で除した数値。  $a = A/W$  の間に①  $S$  と  $a$  は両対数紙上で負の相関を持ち、ばらつきはあるが  $S \times a^{1/3} = 2.4 \sim 4.1$  の範囲に入ること、②  $S \times a^{1/3}$  を地形的滑動力示数と名付け、これがある値以上では崩壊が発生しやすいこと、③未崩壊斜面では  $W$  が不明なため  $W = 5\text{ m}$  と仮定すればよい、等である<sup>3)</sup>。また沖村も同様な逆相関関係を崩壊地の傾斜  $\tan \theta$  と崩壊地下端を基準に設定した集水面積  $A$  との間にも確認した<sup>13)</sup>。

ここでも同様に崩壊斜面と非崩壊斜面について、谷頭急斜面と谷頭底部・水路部の境界の遷緩線上に崩壊源下端を設定して求めた集水面積  $A$  と、最も崩壊の発生に関与する谷頭急斜面の勾配  $\tan \theta$  の関係を両対数紙上に整理した。なお集水面積を求める際に非崩壊斜面の下端幅は各流域毎の崩壊地下端幅の平均を取って中山沢 8 m、椎ノ木ヶ坪沢 10 m とし、谷地形の流心線を中心に設定した。その結果が図-9である。図中には回帰直線を示している。両者に共に相関係数は低く(中山沢 0.26, 椎ノ木ヶ坪沢 0.02) はっきりした相関関数は認められない。また崩壊斜面が右上に分布する傾向があるが、崩壊斜面と非崩壊斜面が明瞭に分離できるわけではない。そして椎ノ木ヶ坪沢では、集水面積と谷頭急斜面勾配が、羽田野<sup>3)</sup>や

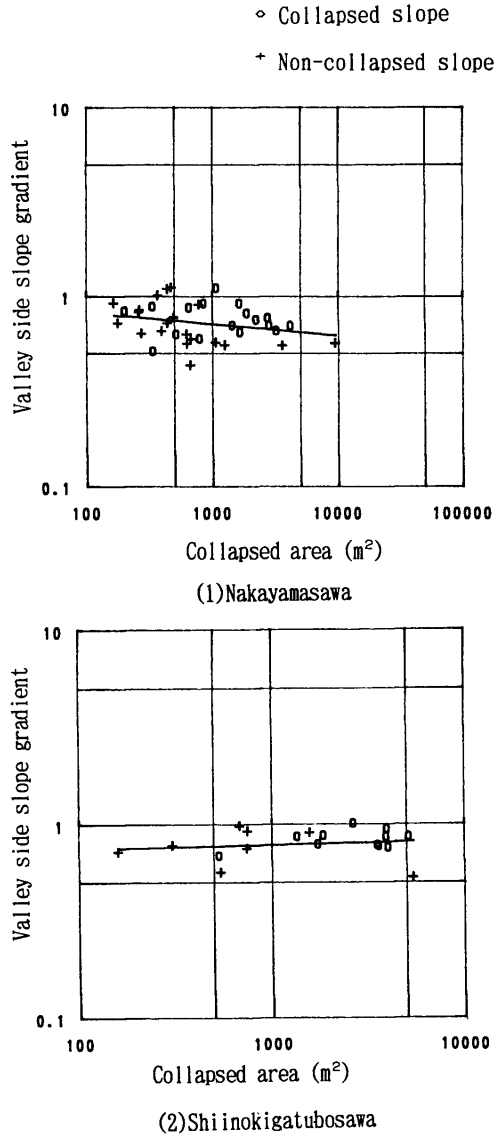


図-9 集水面積と谷頭急斜面勾配の関係

Fig. 9 Relationship between catchment area and valley side slope gradient

沖村<sup>13)</sup>の確認した関係とは逆に、正の相関関係を示している。よってここでは崩壊斜面の方が集水面積及び谷頭急斜面勾配が大きい傾向が確認されたという結果に留まった。

なお集水域平均奥行き  $a$  と谷頭急斜面勾配  $\tan \theta$  の関係も同様であった。

#### 4.3 崩壊規模に関する地形要因の検討

次に崩壊斜面における崩壊規模、つまり崩壊面積と地形特性値との関係について検討する。

##### ① 集水面積と崩壊面積の関係

崩壊斜面における崩壊地の面積と、崩壊地下端を基準

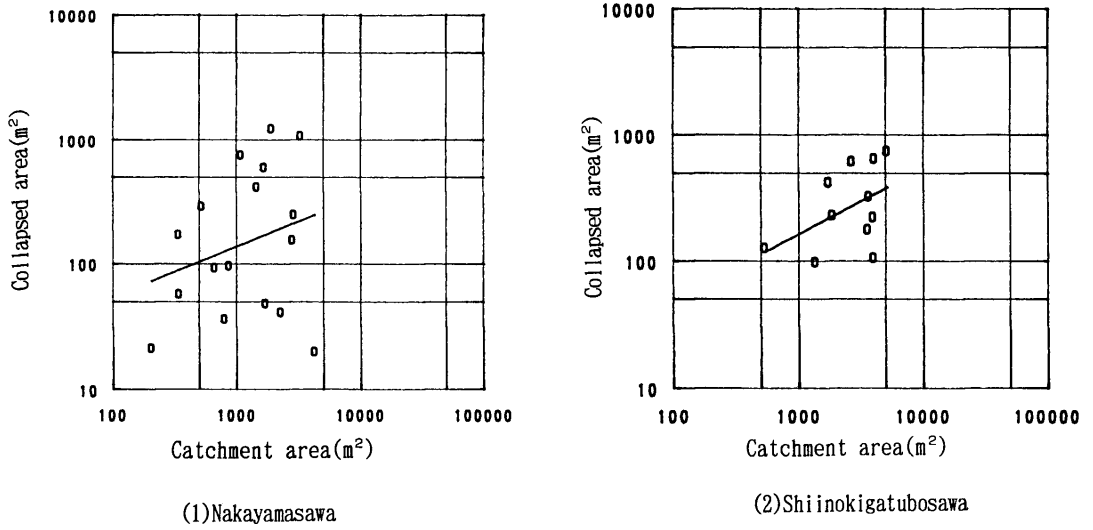
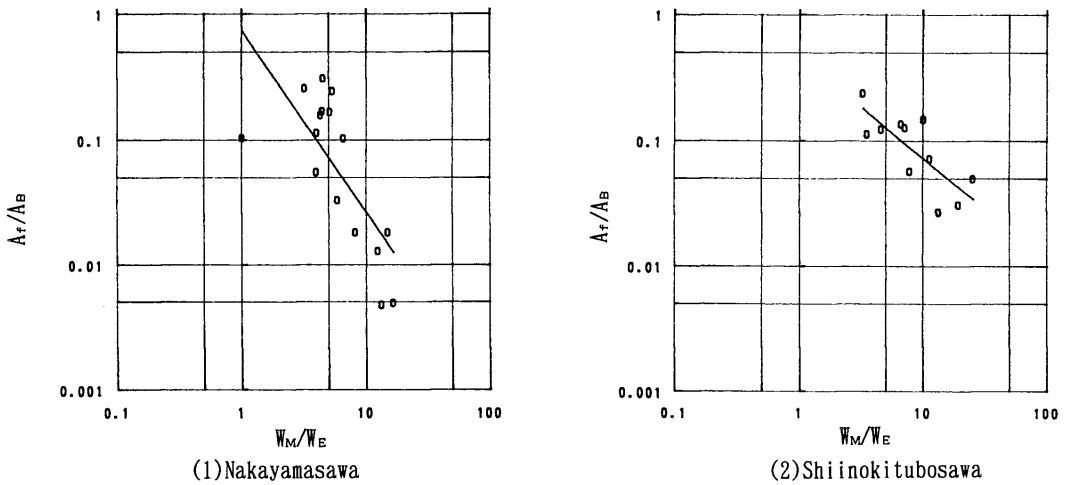


図-10 集水面積と崩壊面積の関係

Fig. 10 Relationship between catchment area and collapsed area



$A_F$ : Collapsed area ( $m^2$ )  
 $A_B$ : Catchment area ( $m^2$ )  
 $W_M$ : Maximum width of the catchment basin  
 $W_E$ : Width at the end of the catchment

図-11 集水域拡幅比と崩壊面積率の関係

Fig. 11 Relationship between  $W_M/W_E$  and  $A_F/A_B$

に設定した集水面積の関係を図-10に示す。両者の相関係数は中山沢0.22と椎ノ木ヶ坪沢0.49でありばらつきが大きいものの、両者共に集水面積が大きいほど崩壊面積も大きいという正の相関関数が両対数紙上で得られた。

② 集水域拡幅比と崩壊面積率の関係

斜面（崩壊地の集水域）の平面形状が斜面末端の地下水位に影響を与えていると考えられる。同一波形の降雨を与えた時の尾根型斜面、谷型斜面、平行型斜面の斜面末端部の地下水位や地下水量について検討した例もあ

る<sup>14)</sup>。

ここでは崩壊地下端を基準に設定した集水域の最大幅を下端幅（つまり崩壊地下端幅）で除した集水域拡幅比と、崩壊面積を集水面積で除した崩壊面積率の関係について検討する。図-11が中山沢と椎ノ木ヶ坪沢についての上記の関係である。これを見ると、集水域拡幅比と崩壊面積率との間の、かなりはっきりした逆相関関係が、両対数紙上で認められる。なお相関係数は中山沢0.65、椎ノ木ヶ坪沢0.68であった。つまり集水域の幅の変化が

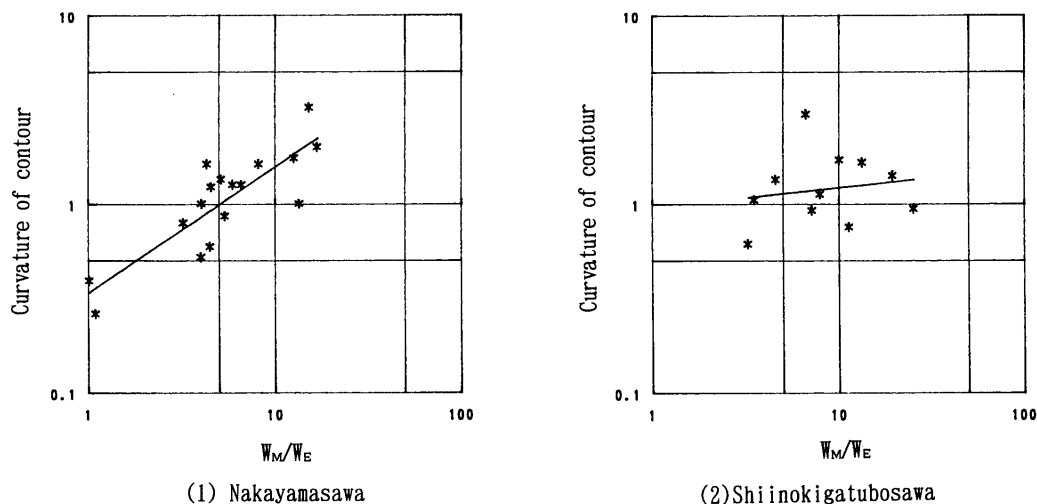


図-12 集水域拡幅比と等高線曲率の関係

Fig. 12 Relationship between  $W_M/W_E$  and curvature of contour

少ない矩形に近い形状の斜面である程、崩壊面積率が大きいということになる。

③ 最後に集水域拡幅比と等高線曲率の関係について検討する。前者は平面的な斜面形状の収束の程度を、後者は斜面横断形の谷の深さの程度を表す数値と考えられる。斜面幅が末端に向かって収束した形状である程、谷形状も顕著になると考えられる。ここで、集水域拡幅比と等高線曲率の関係について検討する(図-12)と、特に中山沢において、はっきりした正の相関関係が両対数紙上で認められる(相関係数0.77)。しかし椎ノ木ヶ坪沢では同様な傾向が認められるものの、相関係数は0.04と低い。しかしながら、傾向としては、集水域拡幅比が大きくなると、等高線曲率も大きくなるという関係が、確認されたといえる。もし両者に相関関係が確認されれば、これまでの議論の中で、集水域拡幅比と等高線曲率を置き換えた議論も可能となるため、さらに検討を進める必要がある。

### 5. おわりに

以上の検討により、以下の事項が判明した。

① 今回の解析対象範囲の山腹斜面について微地形分類を行った。その結果基本的には田村<sup>9)</sup>の行った分類が適用できるが、当地域では谷頭部の発達が著しく、谷頭部内がさらに谷頭急斜面・谷頭緩斜面・谷頭凹地(または平底)に分類できる。また崩壊は谷頭部内で多発しているが、この場合谷頭急斜面最下部の、谷頭凹地(平底)との境界の遷緩線付近に発生している。

② 斜面の最高部と最低部の平均勾配の分布については、崩壊斜面と非崩壊斜面でその差異は認め難い。斜面

をさらに細分化してみると、崩壊斜面の谷頭急斜面勾配の崩壊斜面の分布範囲が、非崩壊斜面のそれより大きな方に偏る。また谷頭急斜面と谷頭底地・水路部の勾配差を見ると、両者の分布範囲の差異がより顕著になる。よって谷頭急斜面勾配が大きい斜面、または谷頭急斜面と谷頭底地・水路部の勾配変化量の大きい斜面が崩壊しやすいと考えられる。

③ 等高線曲率については、非崩壊斜面より崩壊斜面の方が大きい傾向がある。よって斜面の横断形状が顕著な谷形状である斜面が崩壊しやすいと考えられる。

④ 羽田野<sup>9)</sup>や沖村<sup>13)</sup>にならない、集水面積と谷頭急斜面勾配の関係を崩壊斜面と非崩壊斜面について比較した。結果としては既存の研究のようなはっきりした分離は認められず、崩壊斜面の方が集水面積及び谷頭急斜面勾配が大きい傾向が確認されたに留まった。

⑤ 崩壊地の規模については、ばらつきは大きいものの、集水面積が大きくなるほど崩壊面積も大きくなるという、正の相関関係が確認された。次に集水域の最大幅と下端幅の比である集水域拡幅比と、崩壊面積を集水面積で除した崩壊面積率の間に、両対数紙上での逆相関関係が確認された。つまり矩形に近い斜面ほど崩壊面積率が大きく、逆に幅の収束の大きな斜面ほど崩壊面積率が小さくなるということである。

これらの結果より、斜面崩壊の発生や、その規模の推定を行う時に考慮すべき地形要因が抽出できた。今後は他の崩壊事例についても同様な検討を進め、さらに地形要因についての検討を行う必要がある。さらに今後これらの地形要因を用いて、ファジー理論による崩壊発生危険度判定手法や、崩壊規模の推定手法などのエキスパー

トシステムを作成していくつもりである。

最後に地形図作成に御協力頂いた㈱アジア航測皆川忠四郎氏と、現地調査及び解析に御協力頂いた建設省土木研究所急傾斜地崩壊研究室の皆様、そして現地調査の便宜を図って頂いた静岡県砂防課と静岡県下田土木事務所の皆様には感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 建設省道路局: 防災点検ガイドブック(案), pp. 14~27, 1990. 9
- 2) 綱木亮介・吉松弘行・大浦二朗: ファジィ理論による地震時の斜面崩壊の予測, 地すべり, Vol. 27, No. 3, pp. 19~25, 1990
- 3) 羽田野誠一: 最近の地形学 8. 崩壊性地形(その2), 土と基礎, pp. 85~93, 1974
- 4) 平松晋也・水山高久・石川芳治: 雨水の浸透を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 新砂防, Vol. 43, No. 1, pp. 5~15, 1990
- 5) 田村俊和: 湿潤温帯丘陵地の地形と土壌, ベドロジスト, 31, pp. 135~146, 1987
- 6) 吉永秀一郎・武内和彦: 多摩丘陵西部小流域の地質条件と斜面地形, 東北地理, 38, pp. 1~5, 1986
- 7) 中村良光他: 平成3年9月に伊豆半島南部で発生した土砂災害について, 新砂防, Vol. 44, No. 6, pp. 63~67, 1992
- 8) 古谷尊彦・東一樹・今泉真之: 島根県三隅町の斜面崩壊の要因について, 第32回地すべり学会研究発表講演集, pp. 13~16, 1993. 9
- 9) 三森利昭・大倉陽一・堀江保夫: 諸パラメータが表層崩壊に与える影響の数値実験的検討, 新砂防, Vol. 46, No. 1, pp. 3~12, 1993
- 10) 沖村孝・市川龍平・藤井郁也: 表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のためのモデル, 新砂防, Vol. 37, No.5, pp. 4~13, 1985
- 11) 飯田智之: 飽和中間流に対する斜面形状の効果の評価法, 地形, Vol. 5, No. 1, pp. 1~12, 1984
- 12) 中野尊正・吉川虎雄: 地形調査法, 古今書院, pp. 50~52, 1951
- 13) 沖村孝: 地形要因からみた山腹崩壊発生危険度評価の一手法, 新砂防, Vol. 35, No. 3, pp. 48~56, 1983
- 14) 日野幹雄: 一般座標系による差分数値モデル, 洪水の数値予報(その第一歩), 森北出版, pp. 140~166, 1989.10  
(原稿受理日 平成6年4月15日)

---

## 日本学術会議だより No. 36

「第2回アジア学術会議開催される」と題された平成7年3月付の日本学術会議だより No. 36 が日本学術会議広報委員会より送られてきました。主な項目は以下の通りですが、全文のコピーを希望される方は事務局までお申し越し下さい。

### 1. 平成7年度日本学術会議予算

平成7年度予算は11億2千万円余りで、うち6千6百万円程が、平成7、8年度に開催される国際会議の国内開催費として計上されている他、アジア学術会議の開催に2千2百万円が予定されている。

### 2. 第2回アジア学術会議～科学者フォーラム～の概要について

平成7年2月6日(月)から9日(休)までの4日間、三田共用会議所(東京都港区)で開かれ、議長サマリーを掲載している。

### 3. 日学双書の刊行案内

日学双書 No. 22 「尊厳死の在り方」 定価1,000円