

六甲山系南西部における崩壊と地形特性 および雨量特性の変遷

柏谷 健二・沖村 孝・平野 昌繁・奥田 節夫

GEOMORPHOLOGICAL ASPECT OF LANDSLIDE AND TIME CHANGE OF RAINFALL CHARACTER IN THE SOUTH-WEST PART OF ROKKO-SAN MOUNTAINS

By Kenji KASHIWAYA, Takashi OKIMURA, Masashige HIRANO
and Setsuo OKUDA

Synopsis

Severe landslides at the south-west part of Rokko-san mountains in 1938, 1961 and 1967 are discussed and a time series of rain fall character which concerned the landslides is analyzed.

From statistical analysis of the landslides and topography in 1967, it is shown that the number of landslides per unit area increases till the critical angel (31°) as the average slope angle in the area increases. It is also shown that the number of landslides increases till the number of 1st order streams and the drainage density become the critical points, $105/\text{km}^2$ and $15 \text{ km}/\text{km}^2$, respectively and it decreases above the values.

The pattern of distribution in the number or the total area of landslides does not change in the several decades from the data of landslides in 1938, 1961 and 1967.

Annual landslide rainfall is introduced as one of the rainfall characters which is the annual summation of excess daily rainfall which is the excess quantity over $100 \text{ mm}/\text{day}$. The result of harmonic analysis for the rainfall shows that the big extrema of the harmonic function are corresponding to the ages when severe landslides happened and the values also correspond to the scales of the severe landslides.

1. は じ め に

六甲山系やその周辺部における大規模な崩壊等の土砂災害は、昭和13年の阪神大水害、昭和36年6月豪雨による災害、昭和42年7月豪雨による災害が特に著名であるが、これらの他にも豪雨に伴う災害は文献・史料¹⁾にも数多くみられる。個々の災害については、各種の調査・研究が多方面から進められ、その後の防災資料として利用されているものもある²⁾。しかしながら、土砂生産量を与えるモデルについて議論したものやこれまでの崩壊等の土砂災害それ自体を一つの時系列として取り扱い、その経時的变化（歴史性）に着目した研究はそれ程多くはないようである。

崩壊現象を考える場合には一般に、いわゆる侵食力（地形形成営力）と抵抗力（地形構成材料の性質や植生等が関係する）の相互作用を考えなければならない。六甲山系のように風化が深層まで及び、表層部がいたるところでマサ化している地域においては、ある適当な大きさの領域を想定すれば、そこには必ず崩壊可能な物質が存在する。すなわち、適当な大きさの地域を対象とする限り、平均的な地形構成材料の性質は、崩壊に関しては地域的な隔たりが少いとみなすことが可能になるということである。従って、崩壊の多少は地形・植生の条件と地形形成営力に關係する豪雨等の特性に規定されることになる。後で述べる柏谷他

(1976)³⁾ によるモデル

$$\frac{N}{A} = k(R - R_0)^p I^q \dots\dots\dots (1)$$

は、この関係を具体的に表現したものの一例である。ここで、 N は対象地域における崩壊数、 A は対象地域の面積、 k は係数、 R は継続雨量、 R_0 は崩壊無効雨量、 I は対象地域の平均勾配、 p, q は定数である。

また、100年程度の期間を考えれば、崩壊等に伴う微地形変化は確かに存在するが、近年の著しい人工地形改変を除いておおまかな地形条件はほぼ一定と考えてもさしつかえないであろう。さらに、崩壊可能な物質の分布、量がこの期間に極端に変化したとは考えにくいので、適当な対象地域における崩壊の多少の経時的变化は、地震等の誘因を除けば、主として雨量特性の変動に関与しており、それは(1)式における $(R - R_0)^p$ の経時的变化で与えられる。特定の場所・時期によってはそれに加えて植生の影響が認められると考えることができる。

本稿では上記の観点から以下の議論を行う。議論を進めるに際しては、植生の影響の考察は不可欠であるが、資料の制約もありここではその影響はいたるところで同様であるとし、地形特性および雨量特性の経時的变化と崩壊の関係に焦点を絞ることにする。

調査には主として1万分の1地形図(神戸市発行)と空中写真を用いた。また、崩壊地の確認のために現地踏査も行った。一定の方眼を中心とした資料を作成する場合には、縮尺や精度の問題の他に基本とすべき座標系の問題も含まれる。得られた資料を例えばデータ・ベース化して一般化を図るときには、既に平野(1977)⁴⁾によって作成されている六甲山系の資料の準拠した座標系との整合性を考えることが望ましいが、今回の調査地域は限られた部分を対象としているので、神戸市発行の地形図に便宜的な方眼をかけて用いることにした。

2. 調査対象地域に関する基礎資料

2.1 調査地域の概要

調査対象地域はこれまでに度々大規模な崩壊や土砂流出が見られ、下流に多大の災害をもたらしてきた宇治川流域をも含んだ4km×4kmの正方領域(図.1参照)である。宇治川水系再度谷の出口付近には神戸

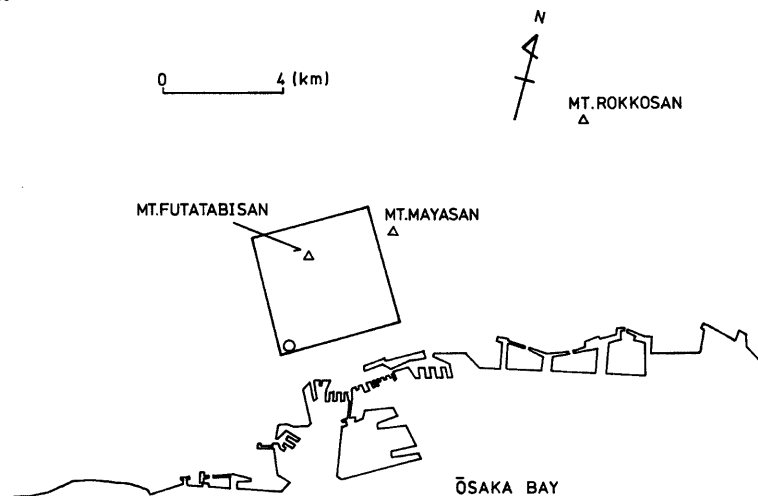


Fig. 1 Location of surveyed area (rectangle). The circle represents Kobe Marine Observatory.

海洋気象台があり、降水資料が比較的豊富に利用できる地域でもある。

この地域は中央部から南部にかけては布引花崗閃緑岩、北部は六甲花崗岩で構成されているが、北西部の山稜上には神戸層群が分布し、南部の低地には大阪層群や沖積層が一部に分布する。これらの花崗岩類の表層部はマサ化がかなり進んでいる。また、いくつかの断層が北東から南西に走り、流域中央部を布引断層が、市街地と山地の境界部には六甲山系の主山陵とほぼ平行して諏訪山断層が延びている⁹⁾。この断層は南北に走るいくつかの小河川を屈曲させ、再度谷の出口付近では小丘陵がシャッター・リッジ状の地形を作り、その間には小盆地を形成している。

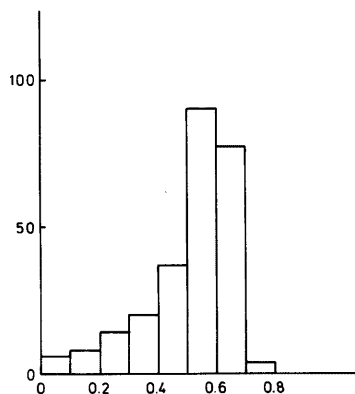


Fig. 2 Frequency distribution of slope angle. The ordinate indicates frequency and the abscissa means tangent of slope angle.

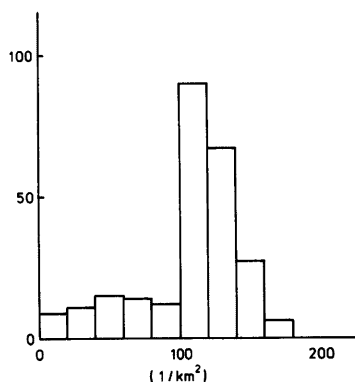


Fig. 3 Frequency distribution of the number of 1st order streams per 1 km x 1 km area.

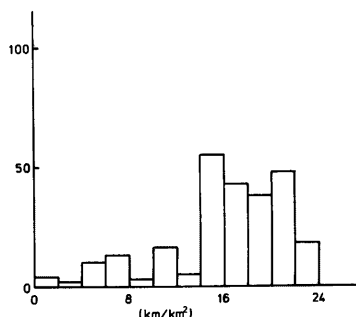


Fig. 4 Frequency distribution of drainage density (km/km²).

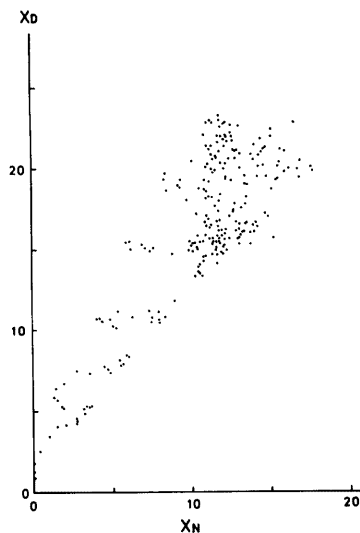


Fig. 5 The relationship between drainage density (X_D) and number of 1st order streams (X_N).

2.2 地形特性

崩壊に関する地形の特徴は種々の因子によって表現されるが、ここでは従来から指摘されている³⁾ 傾斜特性と水系特性を取りあげてみた。

傾斜特性については、1 万分の 1 の地形図を用い、1 km×1 km の方眼内の平均傾斜角をホートン法によ

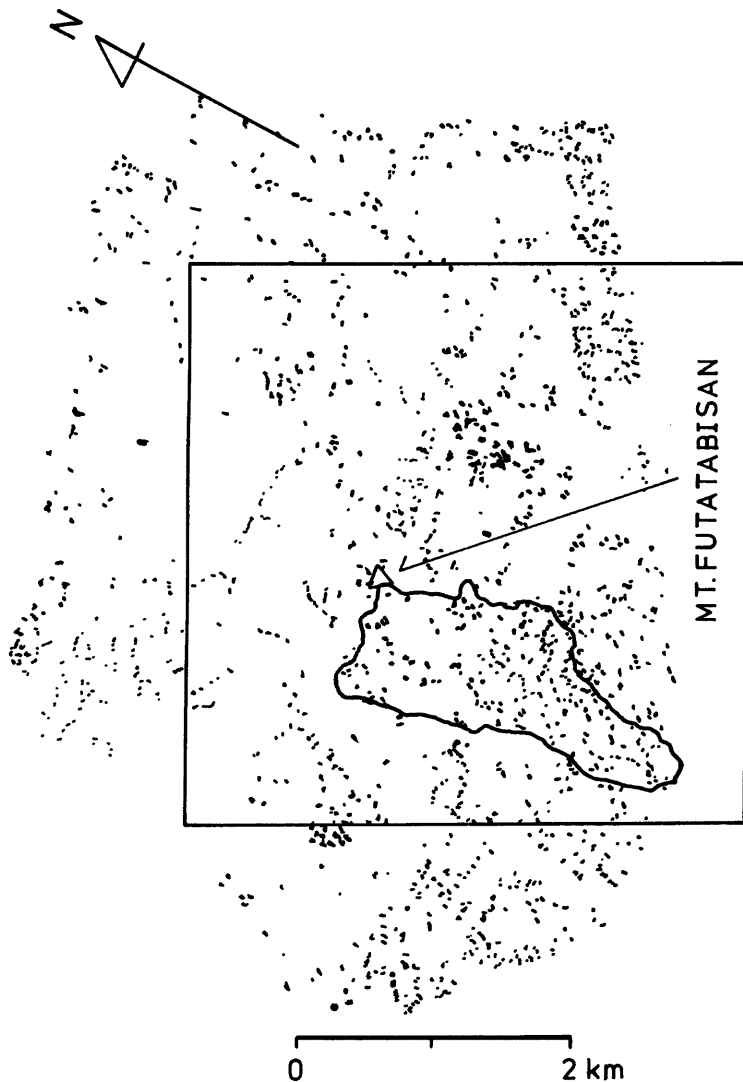


Fig. 6 Distribution of landslides in 1967. Rectangle means surveyed area. After Okimura, 1979



Fig. 7 Distribution of landslides at Futatabi-dani area in 1961. Solid curve means Futatabi-dani basin.

り求め、移動平均を行った。結果は Fig. 2 に示すが、 $26.1^{\circ} \sim 34.5^{\circ}$ の傾斜角の占める割合が大きい。これ以上の急傾斜の部分は少く、より緩傾斜の部分は数は少いが適当に分布しているという特徴をもつ。平均は 26.7° 、標準偏差 8.4° である。



Fig. 8 Distribution of landslides at Futatabi-dani basin in 1938 (after Tanahashi et al, 1939).

水系特性としては、谷頭部に発生する崩壊に関係するものとして一次谷頻度を取りあげ、また側方侵食等に伴う崩壊にも関与するものとして水系密度を取りあげてみた。Fig. 3, Fig. 4 はそれぞれ一次谷頻度、水系密度の頻度分布図である。一次谷頻度の平均は 107.2 個/ km^2 、標準偏差は 36.4 個/ km^2 であり、水系密度のそれは、それぞれ 16.1 km/km^2 、 5.1 km/km^2 である。また、両者の関係は Fig. 5 に示されるが、相関係数は 0.84 と両者間には密接な関係が認められ、どちらかで水系特性を代表させることができそうである。

2.3 崩壊分布図

対象地域の水系網図および昭和42年7月豪雨時の崩壊分布図は沖村（1979）⁶⁾ によって作成されたものを使用した（Fig. 6）。昭和36年6月豪雨時の再度谷周辺部の崩壊分布図は、空中写真より崩壊を判読し、1万分の1の地形図に移写したものである（Fig. 7）。昭和13年7月豪雨時の再度谷の崩壊分布図および崩壊面積は柳橋他（1939）⁷⁾ が作成したもの（Fig. 8）を使用した。ここで使用された地形図（昭和10年陸地測量部発行2万5千分の1地形図を引き伸ばして約1万分の1としたもの）は他に使用された地形図と座標系および精度は異なるが、地形的特徴がもっともよく対応するように方眼を作成した。

3. 解 析

3.1 昭和42年7月豪雨時の崩壊と地形特性

まず、地形図の精度、降雨資料、崩壊地分布など資料の精度が比較的そろっている昭和42年7月豪雨時の崩壊を解析の対象とした。崩壊をもたらしした雨量については対象地域内で場所的な変化があまりないものとして以下の議論を進める。

最初に崩壊と傾斜の関係について検討しよう。ここでは前述の $1\text{km} \times 1\text{km}$ 方眼内の崩壊個数（崩壊個数密度）とホートン法で求めた平均傾斜を方眼の代表傾斜とし、両者の関係を求めた。結果は Fig. 9 に示されるが、崩壊個数密度は平均勾配に比例して約 31° 前後までは増加するが、それ以上になると増加はせず、むしろ減少するものも見受けられる。この傾向は、例えば柏谷他（1976）⁸⁾ が指摘している場合と同様であり、傾斜角がある境界値を超えると崩壊可能な物質が減少することを意味していると考えられる。そこで、このような問題がないと思われる傾斜 31° 以下について回帰式を求めれば

$$Y_N = 94.2X_S - 5.2 \dots \dots \dots (2)$$

となる。但し、 Y_N は崩壊個数密度（個/ km^2 ）、 X_S は平均傾斜角の tangent である。また、相関係数は 0.61 である。(2)式の Y 切片は崩壊の発生に必要な最小限の傾斜角の存在を示唆するが、厳密な検討はこれだけの結果からは行えないので、ここでは議論の対象とはしない。

次に崩壊と一次谷頻度の関係について考えよう。谷の先端部の数をも意味する一次谷頻度は谷の先端領域

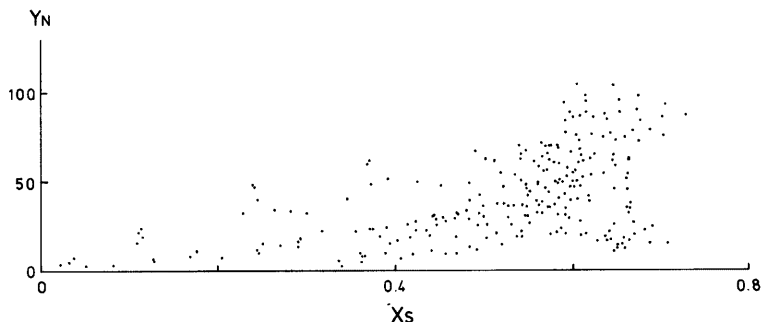


Fig. 9 The relationship between number of landslides per $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ (Y_N) and average tangent of slope angle in the same square (X_S)

における崩壊に関係するものと考えられている⁹⁾。結果は Fig. 10 に示されるが、一次谷頻度が約 105 個/km² までは、一次谷頻度の増加に伴い崩壊個数密度は増大し、その後減少する傾向が認められる。同様の傾向は、当然のことながら、水系密度と崩壊個数密度の関係にも認められ (Fig. 11 参照)、この場合は約 15 km/km² 付近が境界となっているようである。これらの事実は崩壊現象を通じての水系の成長 (一次谷頻度や水系密度の増大) はある限界を有することを示唆しているものと考えられる。一次谷頻度の場合は

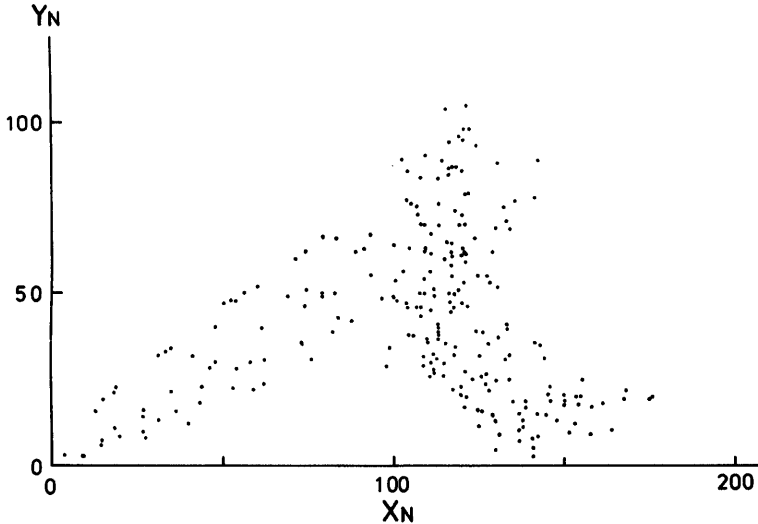


Fig. 10 The relationship between number of landslides per unit area (Y_N) and number of 1st order valleys in the same square (X_N).

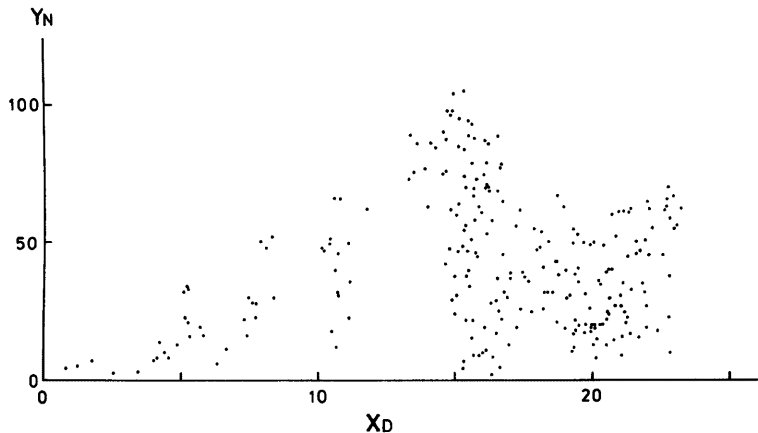


Fig. 11 The relationship between number of landslides per unit area (Y_N) and drainage density in the same square (X_D).

105個/km²、水系密度の場合は15km/km²までの範囲において、それぞれ回帰式を求めると

$$Y_N = 0.53X_N + 4.75 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Y_N = 5.69X_D - 11.5 \quad \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。ここで、 X_N は一次谷頻度（個/km²）、 X_D は水系密度（km/km²）であり、相関係数はそれぞれ0.84、0.83である。

以上の解析は、他の因子が一定であると仮定して、それぞれの関係を求めてみたものであるが、実際には種々の地形因子が複合して崩壊に影響を及ぼしているものと考えられる。そこで、次に地形因子の組み合わせと崩壊の関係について考えてみよう。崩壊に関係する地形因子としては先に検討を加えたものの他にいくつか考えられるが、最初の関係式はなるべく簡便な形が望ましいと思われるので、沖村・泰永（1982）の解析結果¹⁰⁾をも参考にして、傾斜と水系密度（Fig. 5にも示されるように一次谷頻度をも代表できる）を取りあげてみた。ここでも、物理過程が比較的簡単と考えられる傾斜角 31°、水系密度 15km/km²までの範囲を対象として重回帰分析を行った。結果は

$$Y_N = 20.4X_S^{0.54}X_D^{0.45} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表現される。重相関係数は0.85と比較的良好な値が得られる。

この式は調査対象地域における地形因子（傾斜、水系密度）からみた崩壊個数密度（ Y_N ）の推定式である。雨量も含めた他の因子は係数に一括して含まれているということになる。従って、他の因子の影響を考察する場合には、係数に含まれている因子を分離し、より多くの変数を考慮した関係式の検討が必要になるであろう。また、厳密には因子間の関係、独立性、例えば（5）式においては X_S と X_D の関係に関する議論も必要であり、今後の課題であろう。

このような観点から（5）式を（1）式と比較すれば、崩壊個数密度は一般に

$$Y_N = k'(R - R_0)^{\alpha} X_S^{\beta} X_D^{\gamma} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表現されると考えられる。ここで、 k' は係数、 R は継続雨量、 R_0 は崩壊無効雨量、 α 、 β 、 γ は定数である。従って（5）式で係数にあたるものは（6）式では $k'(R - R_0)^{\alpha}$ で、雨の効果が含まれていると考えられる。これらの式において X_D はそれが限界的なもの¹¹⁾であればStrahler (1960)¹²⁾や田中 (1957)¹³⁾が示しているように地質、とくに表層地質によって変化し、表層物質の侵蝕力に対する抵抗特性（地形構成材料の物性）にも関係するものと思われ、それと地形（傾斜）および降雨の相互作用を示す形でモデルが与えられていると見ることも可能である。

3.2 雨量特性からみた崩壊の変遷

ここでは、（5）式に含まれる雨量の影響を特に時系列的に考える。崩壊特性の変遷を検討する場合には一般に、特に一つの斜面を対象とする時は崩壊後再び崩壊可能な風化層が形成されるまでの時間に関する考察は不可欠である。しかし、100年程度の期間における方眼内の崩壊に関する平均的な議論をする場合には崩壊可能な物質が面的に十分存在するかということが問題であろう。

Fig. 12は再度谷流域における昭和13年（Fig. 8参照）と昭和42年（Fig. 6参照）の同一方眼内（600m×600m）の崩壊面積の総和を比較したものである（昭和13年の調査時における崩壊個数の認定方法と昭和42年のそれと明確な対応が困難なため、個数に関する比較はできないが面積については両者とも実測推定値であることから相対的には良い近似値であると考えられ、比較が可能と思われる）。この図からも認められるように、昭和13年に崩壊面積の大きかった地域は昭和42年でも大きいことがわかる。また、昭和42年で崩壊発生ゼロの部分でも昭和13年には発生していることは、降雨条件のちがいを反映していると考えられる。同様の傾向は数は少ないが昭和36年と昭和42年の崩壊個数密度においても指摘され、前回崩壊の多かった地域が次には少くなるという、いわゆる免疫性に関するような現象は、例えば昭和42年は昭和13年に比べて総崩壊面積は減少しているというような全体的傾向は別として、明確には認められない。これは既に述べているように適当な大きさの地域を対象とすれば、数十年程度の期間内では崩壊可能な物質はいつも面的に十分存在することを意味するものと考えられる。従って、崩壊の免疫性も含めた再現性はここでは誘因となる雨量

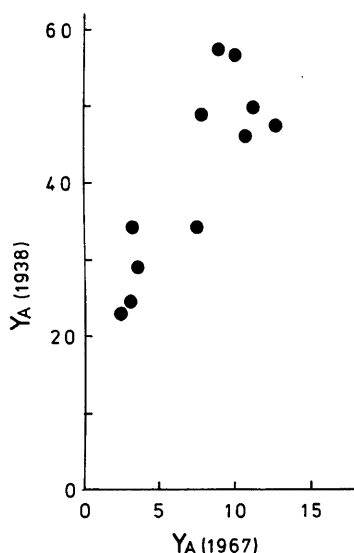


Fig. 12 Comparison between total area of landslides in 1938 per 600 m × 600 m (Y_A (1938)) and total area of landslides in 1967 in the same square (Y_A (1967)).

特性の時系列変化に関係すると推定できる。

雨量特性の検討には1897年から1983年までの87年間にわたる神戸海洋気象台の資料を用いた。大規模な崩壊の原因となる雨量特性については種々の議論はあるが⁽⁴⁾、ここでは便宜的に神戸海洋気象台が大雨水害警報の基準としている100mm/day以上を取りあげ、その超過量の年間総和を年崩壊関係雨量 (annual landslide rainfall) とし、大規模な崩壊が発生しやすい年かどうかの一つの目安とした。これは(6)式において $R_0=100\text{mm/day}$ と考えることに相当している。この値に対してスペクトル解析を行い卓越周期を求めた。その結果、卓越周期として26.8年、13.4年、7.2年、5.6年が得られたので、これを利用して調和解析を行い、年崩壊関係雨量の時系列変化に関する近似関数を求めた。結果はFig. 13に示す。図中、実線部が近似関数で、それは

$$y = 14.4 \cos \left\{ \frac{2\pi}{26.8} (t - 14.4) \right\} + 10.3 \cos \left\{ \frac{2\pi}{13.4} (t - 0.8) \right\} + 17.8 \cos \left\{ \frac{2\pi}{7.2} (t - 5.3) \right\} + 21.8 \cos \left\{ \frac{2\pi}{5.6} (t - 2.1) \right\} \dots (7)$$

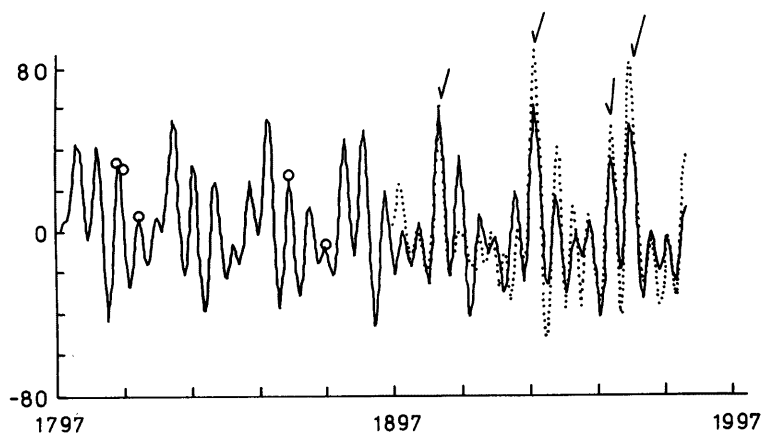


Fig. 13 Time variations of the annual landslide rainfall over the past 187 years. Full line represents the harmonic function from the data of 1897–1983, and dotted line means the modified original data of 1897–1983. Arrows indicate the severe natural disasters by heavy rainfall from observed data, and the circles means the great floods noted in historical documents.

で表現される。ここで t は year を示し、 y は原資料の平均を 0 とし 適当なフィルターをかけたときの年崩壊関係雨量である。破線は原資料の平均値を 0 とし 50 年以上および 4 年以下の周期をもつものをいわば雑音として除去するバンドパスフィルターにかけた結果である。この図で矢印は昭和 13 年 (1938 年)、昭和 36 年 (1961 年)、昭和 42 年 (1967 年) および明治 43 年 (1910 年、大水害と資料に記されている) を示している。この図でもわかるように (7) 式で表現される近似関数と資料の対応は比較的良く、また、再度谷流域内における 3 回の大規模崩壊の相対的な大きさ (Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 参照) とも調和的のように思われる。そこで、資料の出発点である 1897 年より 100 年過去に近似関数を拡張してみた。Fig. 13 中、1897 年以前の実線がこれに対応している。○印は文献¹⁾ 中で大洪水、大風雨洪水と記されているものを記入したものである。対応関係の認められるものもあるように思われるが、資料の精度やかたよりを考えれば、これ以上の議論はできない。しかしながら、ここで用いた手法には予知という問題も含まれており、今回採用した雨量特性が適切かどうかという問題も含めて、大規模な崩壊と対応する雨量特性の経年変化や解析法に関しては十分な検討が必要であり、今後の課題である。

4. まとめと検討

以上、六甲山系の再度谷流域を中心とした地域について崩壊に関する地形特性の検討および崩壊と雨量特性の変遷について議論を行ってきたが、以下のことが明らかになった。すなわち、昭和 42 年 7 月豪雨時の資料解析より、

- i) 崩壊個数密度はある一定の傾斜角まで増加するが、その後は増加しない、
- ii) 崩壊個数密度はある一定水系特性値 (一次谷頻度、水系密度) まで増加するが、その後は減少する、
- iii) 傾斜角および水系特性値 (水系密度) の増加とともに崩壊個数密度が増加する地域では、方眼内の崩壊数は

$$Y_N = 20.4X_3^{0.54}X_2^{0.45}$$

で表現される。これらの事実は崩壊と地形因子の関係を統計的手法で一般に表現する場合には、因子間の相互作用の検討の他に、関係式の成立する範囲に対応する帯域区分が必要なことを示している。

また、昭和 13 年および昭和 36 年の災害時を含めた資料解析より、地形特性の崩壊に果たす役割は数 10 年程度の期間ではあまり変化しないようであり、また適当な大きさの地域を対象とすれば崩壊可能な物質はその中には面的に十分存在することが示唆された。このことは、崩壊の再帰性は、適当な大きさの方眼を対象として考える場合に、外的な条件に規定されるということにつながる。

さらに、長期的な崩壊現象の傾向を考えるために、崩壊に關係する雨量特性として年崩壊関係雨量 (100 mm/day を上回る日雨量のうち 100 mm を超過した量の年間総和) を取りあげ、その経年変化を調解析に基づいた近似関数で表現したところ、顕著な極大値は昭和 13 年、昭和 36 年、昭和 42 年そして大水害のあった明治 43 年に対応することが示された。このことはある種の雨量特性が崩壊等に関する土砂移動量に対応する可能性を示す。従って、雨量特性に関する詳細な検討が加えられ、よりよい近似関数が求められれば、それはいわば地形形成営力の変化を示す一つの関数型を与えるものとなりうる。

この問題は地形発達の数値モデルでは、例えば拡散型の斜面発達モデル¹⁵⁾ を考える場合には、flux の関数型をどう評価するかにつながるが、式が煩雑になるせいもあってか、これまでは地形形成営力の時間的変化を無視することが多かったようである。しかしながら、この変化は地形構成材料の経時的変化とともに本質的な問題である (KASHIWAYA, 1984)¹⁷⁾ ので、地形形成営力の関数型をここで述べてきたような形で導入できれば、既に報告した両者の変化を考慮したモデル (柏谷・奥田, 1983¹⁶⁾, KASHIWAYA, 1984) はより具体的なものとして検証が可能となろう。以上の議論は大規模な崩壊現象の時系列変化を地形発達の中にどのように位置づけるかという問題に帰着するが、時間尺度の基準を明確にすること等を含めて今後の課題としたい。

本研究をすすめるにあたり、神戸大学工学部川谷健教授および片平吉昭氏（現新井組）の御助力を賜った。また研究をまとめるにあたっては、昭和58年度日本生命財団研究助成金（代表者、中西哲神戸大学教授）および昭和58年度文部省科学研究費補助金自然災害科学(1)（代表者、奥田節夫京都大学教授、課題番号58020026）の一部を使用した。記して感謝の意を表したい。本研究の計算には神戸大学総合情報処理センターの計算機（ACOS 1000）および京都大学大型計算機センターの計算機（FACOM M-380）を使用した。

参 考 文 献

- 1) 例えば 神戸市：神戸市水害史，1939，1368 p.
- 2) 例えば 神戸市六甲山系水害対策審議会：六甲山系水害対策に関する答申書，1967，52 p.
- 3) 柏谷健二・平野昌繁・横山康二・奥田節夫：山腹崩壊と地形特性に関して一昭和50年5号台風による高知県下の山腹崩壊を対象として一，京都大学防災研究所年報，第19号 B-1，1976，pp. 371～383.
- 4) 平野昌繁：多目的データベースとしての六甲山地のデジタル・マップの作成，情報地質，3，1977，pp. 33～43.
- 5) 藤田和夫・笠間太郎：5万分の1地質図・神戸，地質調査所，1983.
- 6) 沖村 孝：水系網分布と崩壊発生の研究一崩壊地形立地解析 I一，建設工学研究所報告，第21号，1979，pp. 37～60.
- 7) 棚橋嘉市・太田芳夫・菅谷惣治：昭和13年7月5日の豪雨による神戸裏山再度谷の山崩調査報告，海と空，19，1939，pp. 87～99.
- 8) 前掲3)
- 9) 例えば 塚本良則：侵蝕谷の発達様式に関する研究 (I)一豪雨型山崩れと谷の成長との関係についての一つの考え方一，新砂防，25，1973，pp. 4～13.
- 10) 沖村 孝・泰永一智：HORTON 則と崩壊特性の研究一崩壊地形立地解析 IV一，建設工学研究所報告，第24号，1982，pp. 259～290.
- 11) KASHIWAYA, K.: A mathematical model for the temporal change of drainage density, 地形，4，1983，pp. 25～31.
- 12) Strahler, A. N.: Physical geography (2nd ed.), Wiley, 1960, 534 p.
- 13) 田中真吾：瀬戸内海沿岸地域における谷密度と岩石（花崗岩および古生層）との関係について，地理評，30，1957，pp. 564～579.
- 14) 例えば前掲3)
- 15) 平野昌繁：斜面発達モデルと侵蝕係数決定法の問題点，地形，2，1981，pp. 1～6.
- 16) 柏谷健二・奥田節夫：水系密度の変化に関する理論的考察，京都大学防災研究所年報，第26号 B-1，1983，pp. 445～457.
- 17) KASHIWAYA, K.: A mathematical model on the erosional process of a mountain, 地形，1984（投稿中）.