

降雨確率と表層崩壊確率に関する シミュレーションによる検討 (2): 長期的にみた場合の崩壊に効果的な降雨の再現期間

飯田 智之*

Theoretical Research on the Relationship between Probability Distribution of Rainfall and Shallow Landslide: On the Effective Return Period of Rainfall for Landsliding from the Long Term Perspective.

Tomoyuki IIDA *

Abstract

From a geomorphological perspective, heavy rainfalls with long return periods are not necessarily effective in producing shallow landslides because they seldom occur. This issue relates to magnitude-frequency issues in geomorphology. The effective return period of rainfall for long-term analyses of shallow landsliding was then theoretically estimated using a stochastic landslide model. The probability density function P_r of return periods N for rainfall events that generate landslides can be expressed as $P_r = S(N)/N^2$, where $S(N)$ is the probability that rainstorms with a return period N trigger landslides. N_{max} , corresponding to the maximum of P_r , can be considered as the most effective for landsliding. For transport-limited conditions, $P_r = 1/N^2$ when $N > N_0$, and $P_r = 0$ when $N < N_0$, where N_0 is the critical return period of rainfall and constant. Therefore N_{max} is equal to N_0 . For weathering-limited conditions, the values of P_r were calculated in a field site using a DEM. It was found that the average values of the probability density P_r is influenced by the average recurrence interval of shallow landsliding and slope angle. It was also found that rainfall events with return periods < 500 and < 1000 years trigger about 50 and 65 % of the total number of landslides over the long term, respectively.

Key words: *shallow landslide, stochastic model, heavy rainfall, effective return period of rainfall.*

1. は じ め に

地形学的な長期のタイムスケールで考えた場合、どのような降雨量あるいはどのような

2002年5月16日受付, 2002年10月7日再投稿, 2002年10月28日受理

* (財)地域地盤環境研究所

* Geo-Research Institute, Osaka Soil Test Lab., Itachibori Nishiku Osaka 550-0012, Japan.

再現期間の降雨が崩壊発生に最も寄与しているかという問題がある。斜面災害時の崩壊数や崩壊確率は、一般に降雨量の増加と共に増大するが、長期間で比較した場合には、そのような降雨の発生頻度は逆に減少するために、再現期間の大きな降雨ほど崩壊に効果的であるとは、必ずしも言えないからである。すなわち、斜面崩壊の発生に最も効果的な降雨の再現期間が存在することが予測できる。また、斜面崩壊に必要な雨量は一様ではないので、個々の斜面ごと、流域ごと、あるいは斜面グループごとに、崩壊に効果的な降雨の再現期間が異なることが予想される。

この問題は Wolman and Miller (1960) により提起された、地形形成プロセスに関する規模と頻度の問題の一種である。崩壊の規模と頻度の問題については羽田野 (1968)、平野・大森 (1989) などにより詳しい検討がなされているが、崩壊を発生させる降雨の規模と頻度（再現期間）の問題に関する検討は、これまでほとんどなされていない。

ここでは、筆者の提案する表層崩壊の確率モデルを用いて、免疫性がない場合とある場合のそれぞれについて、崩壊に効果的な降雨の再現期間について理論的な検討を加える。

2. 崩壊確率モデルの考え方

テフラや樹木年輪などの年代指標を用いた、表層崩壊の履歴に関する研究の進展により、湿潤温暖気候帯の主要なマスマーブメントは表層崩壊であり、急斜面では風化や土壌クリープによる土層の集積と表層崩壊による土層の除去が交互に発生している、ということが明らかにされてきた（守屋, 1972; 下川, 1983; Shimokawa, 1984; Sidle, 1987; 柳井, 1989; 吉永・西城, 1989; 清水ほか, 1995; Montgomery and Dietrich, 1994; Dietrich et al., 1995; 吉木, 1997 など）。筆者は、これらの成果をもとに表層崩壊の発生確率に関するモデル化を試みてきたが、各指標の定義とそれぞれの関係を以下に述べる。

長期崩壊確率 P ・短期崩壊確率 Q ・土層年齢頻度分布 n

飯田 (1993) によれば、風化等による土層深の増加と表層崩壊による土層の除去を繰り返す急斜面について定常確率過程を仮定し、前回の崩壊後 i 年後（の 1 年間）に崩壊する確率を長期崩壊確率 $P(i)$ 、また $(i-1)$ 年後まで崩壊しなかった斜面が i 年後（の 1 年間）に崩壊する確率を短期崩壊確率 $Q(i)$ と定義すると以下のようなになる。

$$P(i) = \{1 - Q(1)\} \cdots \{1 - Q(i-1)\} Q(i) \quad (1)$$

降雨による崩壊を考えると、 $Q(i)$ は前回の崩壊後 i 年後の斜面が崩壊するのに必要な限界降雨量の超過確率となり、その再現期間 N は次式となる。

$$N = 1 / Q(i) \quad (2)$$

免疫性の有無の問題や、Transport-limited Condition か Weathering-limited Condition のどちらか、といった問題は $Q(i)$ の経年的変化状況に帰着できる。

また、平均崩壊期間 T_{av} は崩壊期間 i の期待値として次式で示される。

$$T_{av} = \sum P(i)i \quad (3)$$

一方、表層崩壊を繰り返す斜面について、ランダムな年にサンプリング（測定）した場合の土層年齢（＝崩壊後の経過年数） i の頻度分布を $n(i)$ （ $n(0)$ は崩壊直後の頻度）とすると、上記の $P(i)$ または $Q(i)$ との関係は以下のようになる。

$$P(i) = \{n(i-1) - n(i)\} / n(0) \quad (4)$$

$$Q(i) = \{n(i-1) - n(i)\} / n(i-1) \quad (5)$$

$$n(i) = \{1 - \sum_{k=1}^i P(k)\} / \sum_{i=1}^{\infty} \{1 - \sum_{i=1}^i P(k)\} \quad (6)$$

ただし $\sum_{k=1}^{\infty} P(k) = \sum_{k=0}^{\infty} n(k) = 1$ である。

なお、飯田（1996）によれば、土層年齢頻度分布に関する定常性に加えて、さらに頻度の時間分布と空間分布が等しいというエルゴード性を仮定すれば、 n は広域に分布する同じ短期および長期崩壊確率分布を持つ斜面グループから同時にサンプリングしたときの土層年齢の頻度分布とも一致する。

3. 崩壊を発生させる降雨の再現期間の確率密度

降雨の発生確率や再現期間として、一般的には1時間雨量や日雨量といった一定時間の降雨量を対象としたものが知られている。一方、降雨と表層崩壊や土石流の関係については従来から多数の研究がなされており、実効降雨やタンクモデルの水位などの指標が広く用いられている（例えば、鈴木ほか、1979 など）。これは崩壊と直接的に関係するのは降雨量そのものではなく、斜面における飽和側方浸透流の水深や土壌水分の増加であると考えられているからである。したがって、厳密には飽和側方浸透流の水深や土壌水分の再現期間（発生確率）と崩壊の関係が問題となるが、これらの再現期間は近似的にそれぞれの継続時間の降雨の再現期間に対応すると考えられる。そこで、本稿で‘崩壊を発生させる降雨の発生確率またはその再現期間’と言う場合は、飽和側方浸透流の水深や土壌水分に対応したものとする。

さて、特定の斜面における長期間の崩壊履歴を想定した場合、崩壊を発生させる降雨の再現期間 N 年の確率密度 P_r は、降雨の再現期間の確率密度 $f(N)$ と、その降雨が発生した場合に崩壊する確率 $S(N)$ の積として次式で表せる。

$$P_r = f(N) S(N) \quad (7)$$

ここで、再現期間 N (≥ 1) 年の降雨の超過確率は定義より $1/N$ となるため、その確率密度 $f(N)$ は $\int_N^{\infty} f(N) dN = 1/N$ より次式で示される。

$$f(N) = 1 / N^2 \quad (8)$$

したがって、(7) 式は次式となる.

$$P_r = S(N) / N^2 \quad (9)$$

以上のことより、崩壊を発生させる降雨の再現期間の確率密度を求めるためには、 $S(N)$ の評価がポイントとなる. なお、 P_r を最大とする、すなわち崩壊に最も効果的な降雨の再現期間 N_{max} は次式で定義される.

$$P_r(N_{max}) = \text{maximum} \quad (10)$$

以下、免疫性がない場合とある場合に分けて検討を加える.

4. 免疫性がない場合の崩壊に効果的な降雨の再現期間

“免疫性がない場合 (Transport-limited Condition)” を、ここでは (1) 式の短期崩壊確率 $Q(i)$ が前回の崩壊後の経過年数 i に無関係で一定の場合と定義する. これは確率過程の一種でポアソン過程とよばれる現象に対応する. そこで、 $Q(1) = Q(2) = \dots = Q(i) = Q_0$ (一定値, $かつ < 1$), $N_0 = 1 / Q_0$ とすると (1), (2), (3), (6) 式の近似計算より次式がなりたつ.

$$P(i) = Q_0 (1 - Q_0)^{(i-1)} = Q_0 \exp \{-Q_0(i-1)\} \quad (1)'$$

$$T_{av} = \sum \{P(i)i\} = 1 / Q_0 = N_0 \quad (3)'$$

$$n(i) = n(0)P(i+1) / Q_0 = P(i+1) = Q_0 \exp(-Q_0 i) = P(i) \quad (6)'$$

(なぜなら、 $n(0) = Q_0$ より)

すなわち、平均崩壊期間 T_{av} は、崩壊発生に必要な限界降雨の再現期間 N_0 に一致し、 P と n も重なる. 例として、 $Q_0 = 0.01$ すなわち $N_0 = 100$ 年 ((2) 式より) のときの P , Q , n を示すと Fig. 1 のようになる.

免疫性がない場合の (9) 式の S に関して上記の N_0 を用いると、定義により降雨の発生するタイミングにかかわらず、再現期間 $N > N_0$ の降雨が発生したら必ず崩壊し、逆に $N < N_0$ の降雨が発生しても絶対に崩壊しない、としているので次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} S &= 1 & (N > N_0) \\ &= 0 & (N < N_0) \end{aligned} \quad (11)$$

したがって (9), (11) 式より、免疫性がない場合の崩壊を発生させる降雨の再現期間の確率密度 P_r は次式となる.

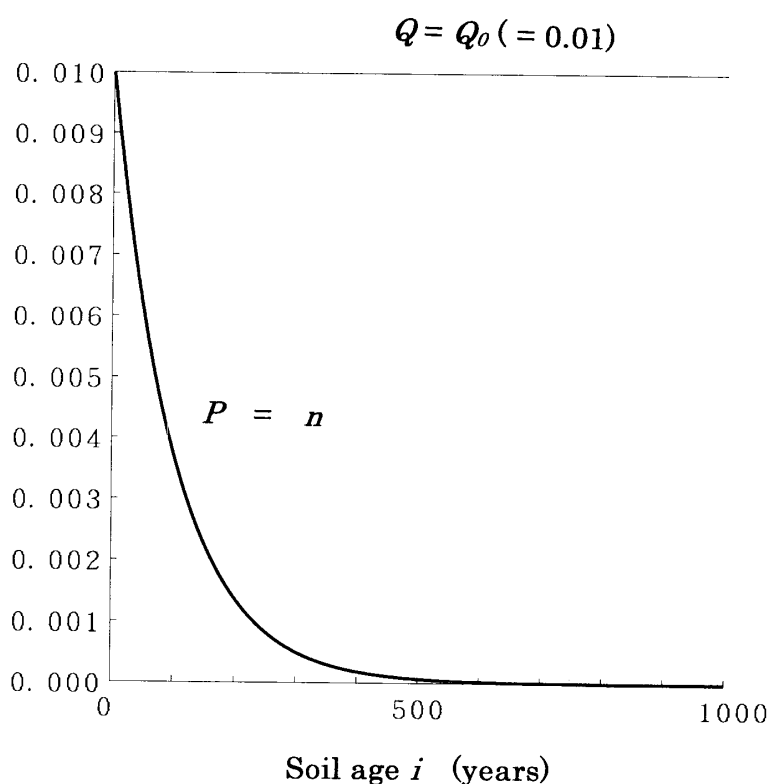


Fig. 1. An example of Q , P and n for transport-limited conditions, where Q is short-term probability of landslide, P is long-term probability of landslide, n is frequency distribution of soil age i , and $N_0 (=1/Q_0)$ is critical return period of rainfall. This corresponds to $N_0 = 100$ years.

$$\begin{aligned} P_r &= 1/N^2 & (N > N_0) \\ &= 0 & (N < N_0) \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 1と同じく, $Q_0 = 0.01$ ($N_0 = 100$ 年) の場合の S と P_r の例を Fig. 2に示す. 崩壊に最も効果的な降雨の再現期間 N_{max} は T_{av} および N_0 と等しい. すなわち, 免疫性がない場合には, 崩壊を発生させる最小の再現期間 N_0 の降雨が崩壊に最も効果的である.

また, 特定の斜面について崩壊を発生させる降雨の再現期間を比較するために, 全体の確率が1となるように相対確率密度 P_r' を定義すると, P_r' は次式で示される.

$$\begin{aligned} P_r' &= N_0/N^2 \quad (N > N_0) \\ &= 0 \quad (1 < N < N_0) \end{aligned} \quad (13)$$

例として Fig. 3に N_0 が 100 ~ 500 年の 100 年ごとの P_r' を図示する. さらに, $N_0 < N < MN_0$ (M は 1 以上の定数) の再現期間の降雨で崩壊する確率 PP_r は, その期間における P_r' の積分値として, 以下のようなになる.

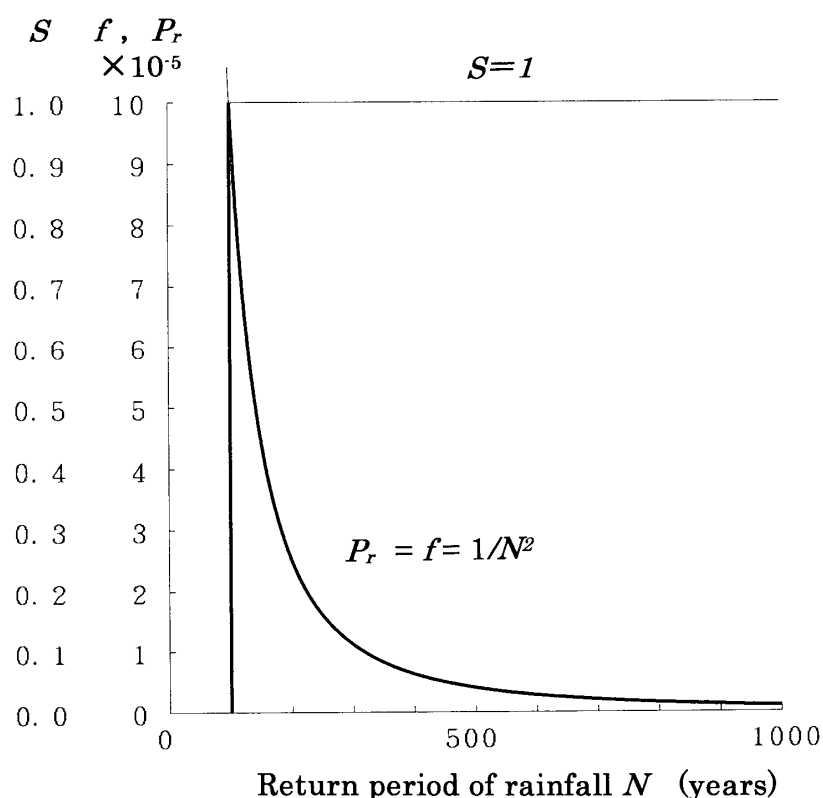


Fig. 2. An example of P_r for transport-limited conditions, where P_r is the probability density function of return periods N for rainfall events that generate landslides. This corresponds to $N_0 = 100$ years.

$$PP_r = \int_{N_0}^{MN_0} P_r' dt = 1 - 1/M \quad (14)$$

例えば、 $M = 2$ の場合には $PP_r = 1/2$ (= 50 %) となるが、これは例えば限界降雨量の再現期間が 100 年となる斜面について、再現期間が 100 年から 200 年の間の降雨で崩壊が発生する確率が 50 %であることを示す。同様に、 $M = 3$ の場合、再現期間が 100 年から 300 年の間の降雨で崩壊が発生する確率は 67 %となる。

5. 免疫性がある場合の崩壊に効果的な降雨の再現期間

5.1 免疫性がある場合の崩壊を発生させる降雨の再現期間の確率密度

“免疫性がある場合 (Weathering-limited Condition)” を、ここでは (1) 式の短期崩壊確率 $Q(i)$ が、以下に示すように土層深の変化に伴い経年的に変化する場合と定義する。

次節で示すように、粘着成分を持つ斜面土層の安定解析によれば、ある再現期間の降雨が発生した場合に、崩壊が発生するか否かはそのときの土層深 (年齢 i の関数) に依存しており、降雨により発生する飽和側方浸透流の水深が土層深に対応した臨界水深以上であれば崩壊し、それ以下であれば崩壊しない (飯田, 1993)。すなわち、(9) 式の崩壊する確

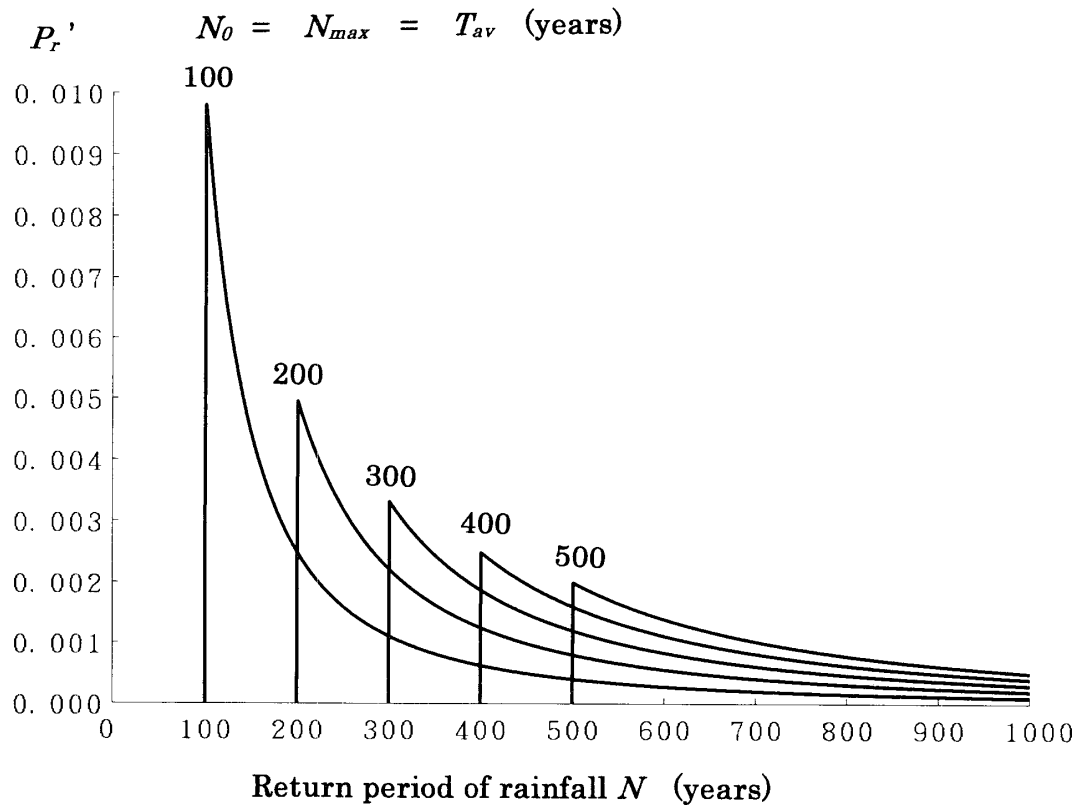


Fig. 3. Examples of P_r' for transport-limited conditions, where P_r' is relative probability density function of return periods N for rainfall events that generate landslides.

率 S は降雨量のみでなく、土層深との関係で降雨の発生するタイミングにより決まる。また、一般に急斜面では、臨界水深は土層深の増加とともに減少し崩壊しやすくなると考えられるため、2章のように土層年齢頻度分布 n に関して定常性を仮定すれば、 S は再現期間 N 年の水深で崩壊する土層年齢（深）以上の斜面の相対頻度として以下のように表せる。

$$S = \sum_{i=i(N)}^{\infty} n(i) \quad (15)$$

ただし、 $i(N)$ は再現期間 N 年の水深が臨界水深となる土層深に対応した土層年齢であり次式がなりたつ。

$$Q(i(N)) = 1/N \quad (16)$$

したがって、(9) 式は次式となる。

$$P_r = \sum_{i=i(N)}^{\infty} n(i) / N^2 \quad (17)$$

免疫性がある場合の崩壊を発生させる降雨の再現期間については (17) 式の $n(i)$ を具体的に評価する必要があるため、本稿では島根県浜田市の試験地に適用した表層崩壊確率

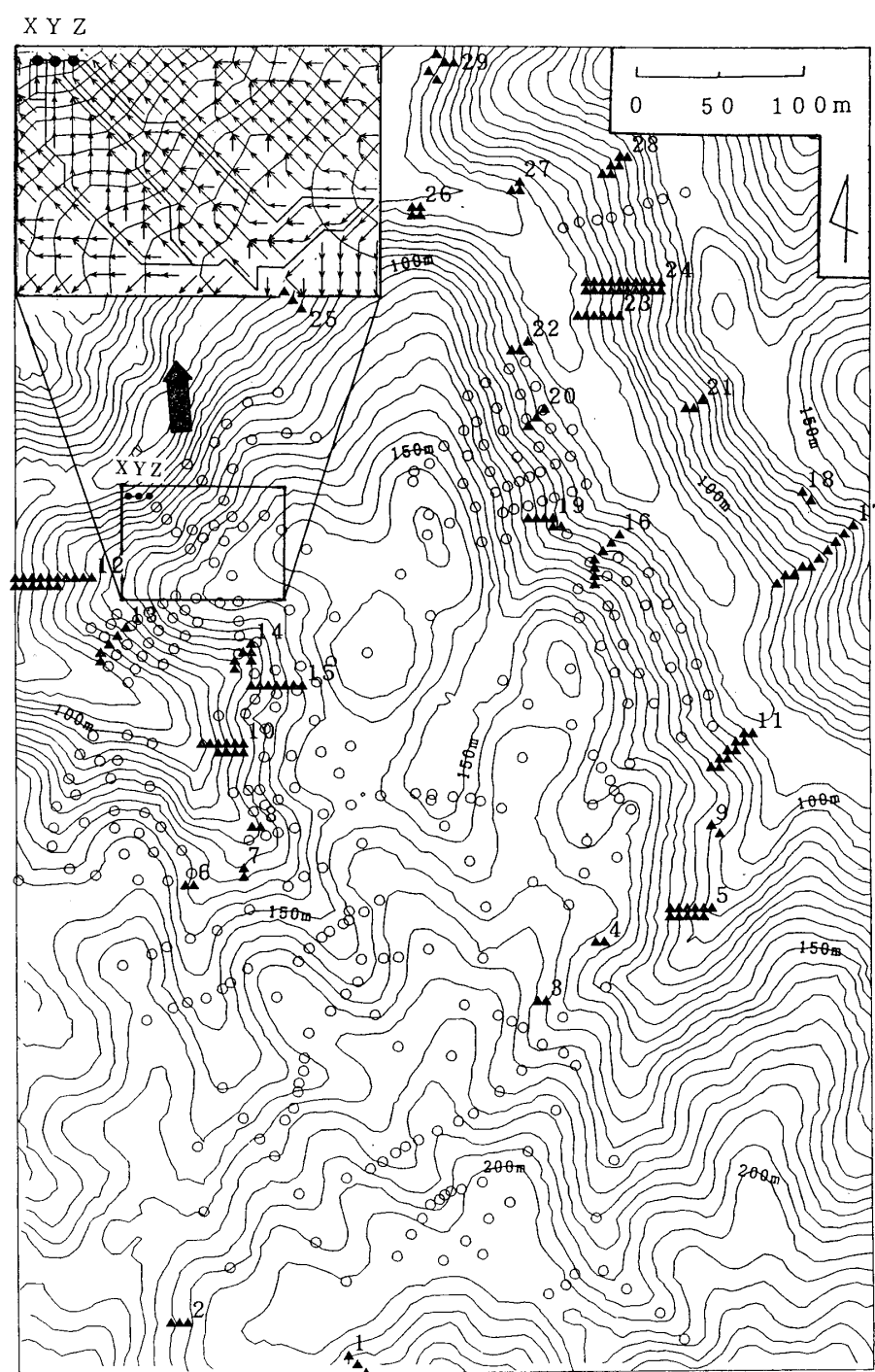


Fig. 4. A map of the field site contoured from a DEM with a 5 m grid interval (Iida, 1999). For weathering-limited conditions, the values of P_r were calculated in the field site. Examples of flow lines (arrows) are shown for a small area in the enlarged inset. Open circles indicate penetration test sites. Triangles indicate numbered landslide scars in 1988. Each triangle corresponds to a DEM grid cell. The bedrock is andesitic.

モデル (Iida, 1999; 飯田, 2000) を用いて検討する. モデルの基本的な考え方と概要を以下に示すが, 詳細については上記論文を参照されたい.

5.2 免疫性を考慮した表層崩壊確率モデルの概要

モデルの構成は以下に示すとおりである.

- ・降雨確率: 浜田測候所データにもとづく, タルボット型確率降雨強度式による.
- ・浸透流解析: 地形単位図を用いた飽和側方浸透流の簡易流出解析による.
- ・安定解析: 無限長斜面安定解析による.
- ・土層の成長: 基盤の風化と土壌クリープを考慮した対数型土層成長モデルによる.

前節で述べたように, 表層崩壊は主に降雨により発生する飽和側方浸透流によって引き起こされるため, 直接的な誘因は浅い地下水である. 無限長斜面の安定解析によれば, 土層深に応じた飽和側方浸透流の臨界水深 H_c が存在するが, 降雨確率と浸透流解析を組み合わせることにより, 任意の地点における飽和側方浸透流の水深の発生確率が降雨と同様に対数正規分布により求められる. この場合, 短期崩壊確率 $Q(i)$ は臨界水深の超過確率となり, 再現期間はその逆数となる. また, この臨界水深の再現期間は, 地形ごとに特有な継続時間の降雨の再現期間と一致するため, 以下降雨の再現期間とする. 免疫性を考慮した本モデルでは土層深が免疫土層深 D_{im} (H_c と一致する土層深として無限長斜面の安定解析から求まり, 斜面傾斜等の関数である.) まで成長する期間は免疫期間 (immunity period; i_{im}) に対応し, いかなる降雨に対しても崩壊しないが, それ以上になると急斜面における臨界水深は徐々に減少するため, 土層深の増加とともに短期崩壊確率 $Q(i)$ が増加する, すなわち崩壊しやすくなるとしている. このような斜面プロセスを考慮した崩壊確率モデルを, 島根県浜田市の安山岩丘陵地における 500 m × 800 m の試験地 (Fig. 4) に適用した. その際に 5 m メッシュ数値地図 (DEM) を利用したが, メッシュ (単位斜面) ごとに (1), (6), (17) 式により P_r を求めた.

5.3 崩壊に効果的な降雨の再現期間

(1) 特定の斜面についてみた場合の崩壊に効果的な降雨の再現期間

先に定義した Q , P , n の例として, 地点 (メッシュ) ごとに実施した 2 つの計算例を Fig. 5a, b に示す. 免疫期間終了時の短期崩壊確率 $Q(i_{im})$ の逆数 N_{im} ($= 1 / Q(i_{im})$) はそのときの斜面を崩壊させるのに必要な降雨の再現期間となる. Fig. 5a の図中に再現期間が 400 年に対応する $S(400)$ (Fig. 6a 参照) の求め方が示されている. Fig. 5a, b と同じ地点を対象として計算した $S(N)$ と $P_r(N)$ の例を Fig. 6a, b に示す. $S(N)$ は単調増加関数であるが, 降雨の再現期間が上記の N_{im} 以上では一定となる. したがって, 単調減少関数 $f(N)$ と広義の単調増加関数 $S(N)$ の積で定義された $P_r(N)$ は一般的にピーク値を持つが, そのときの N が最も崩壊の発生に寄与する降雨の再現期間 N_{max} となる. Fig. 6a の例の場合は, N_{max} は N_{im} と一致している. 免疫性がある場合は一般的に $N_{max} \leq N_{im} < T_{av}$ の関係が成り立つが, 崩壊の発生に最も寄与する降雨の再現期間 N_{max} は崩壊の再現期間 (= 平均崩壊期間) T_{av} と比較してはるかに小さい場合が多い.

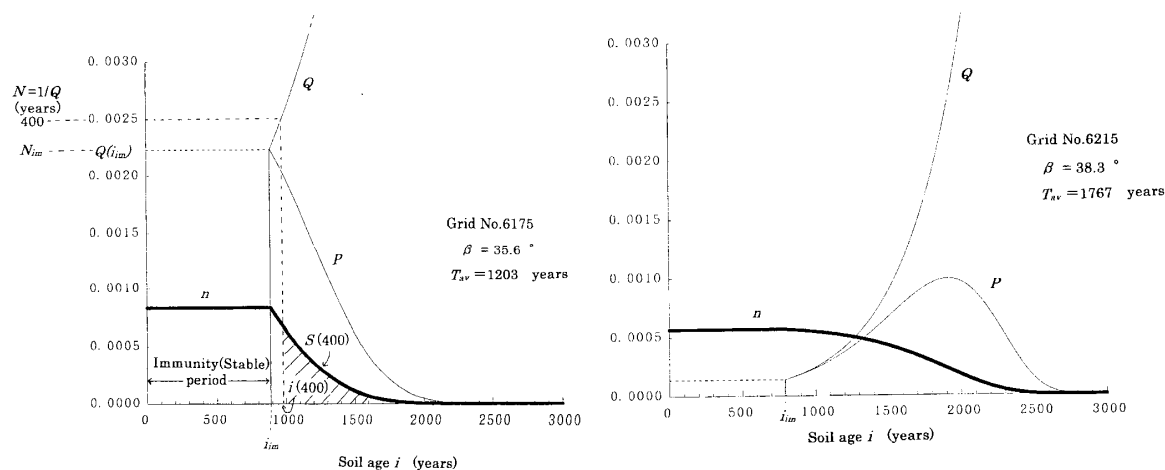


Fig. 5a, b. Two examples of Q , P and n for weathering-limited conditions. N is return period of rainfall. Both i_{im} and N_{im} correspond to the immunity soil depth D_{im} in Fig. 5 a. $S(400)$ corresponds to the return period of 400 years (see Fig. 5 a and Fig. 6 a).

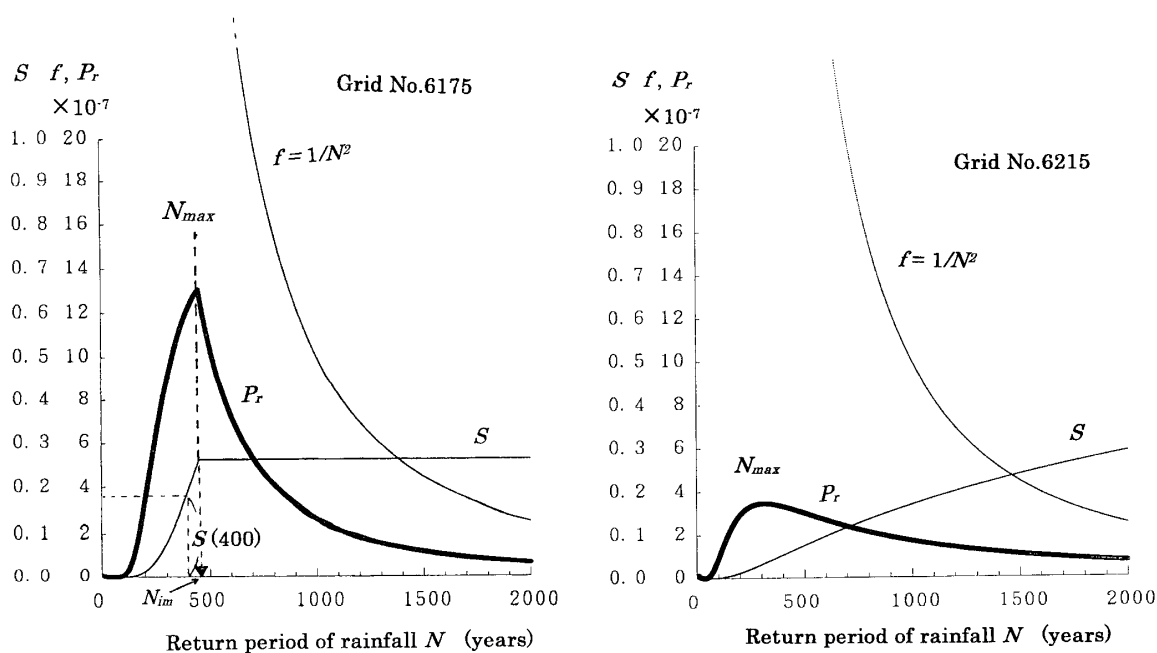


Fig. 6a, b. Two examples of S and P_r for weathering-limited conditions, where S is probability of landslide when rainfall with return period N occurs, P_r is probability density function of return period for rainfall events that generate landslides, and f is probability density function of return period N of rainfall.

(2) 広域でみた場合の崩壊に効果的な降雨の再現期間

すべてのメッシュを対象とし、斜面傾斜 β のクラスごとに求めた P_r の平均値のグラフを Fig. 7 に示す。崩壊の発生に最も寄与する降雨の再現期間 N_{max} は、 $\beta > 50$ 度の場合は 0 ～ 100 年の間にあるが、 $45^\circ < \beta < 50^\circ$ の場合は 100 ～ 200 年の間にある。同じく崩壊の平均再現期間 T_{av} のクラスごとに求めた P_r の平均値のグラフを Fig. 8 に示す。 T_{av} が 1000 年未満の場合は崩壊に最も効果的な降雨の再現期間 N_{max} は 100 年未満である。さらに Fig. 9 は同じくすべてのメッシュを対象とし、かつ長期間で集計した場合の、崩壊を発生させた降雨の再現期間の頻度分布（長期間の崩壊メッシュの合計頻度を 100 % とする）と累積曲線を示したものである。この場合、崩壊に最も効果的な降雨の再現期間 N_{max} は 100 ～ 200 年の間にある。また、累積曲線から、この試験地全体の長期間の崩壊を考えた場合、再現期間 500 年未満の降雨で約 50 %、また再現期間 1000 年未満の降雨で約 65 % の崩壊が発生することが推定される。

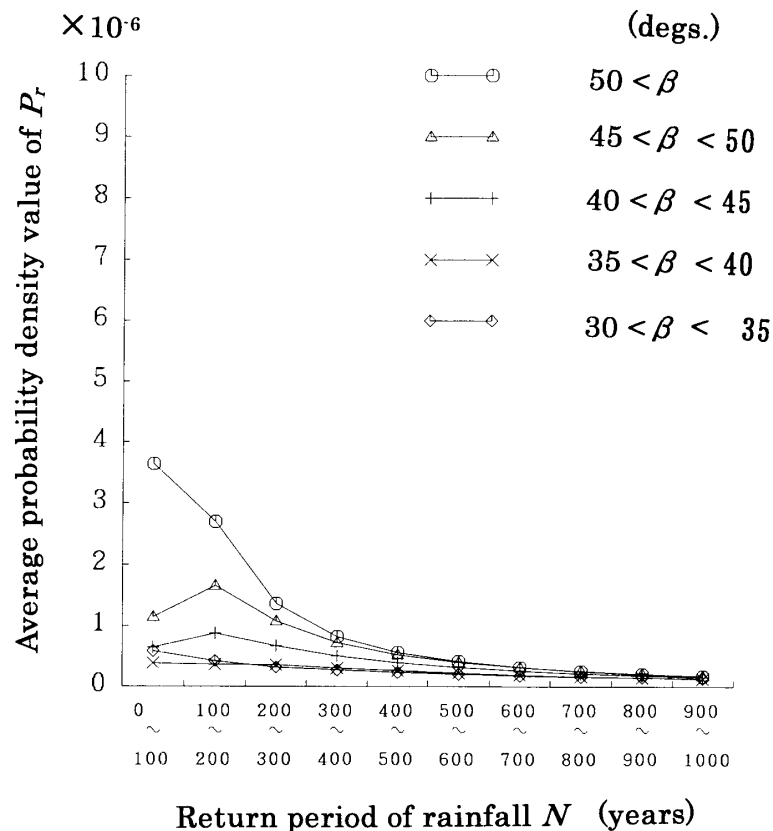


Fig. 7. Average probability density values of P_r of all grid cells for every class of return period of rainfall and for every class of slope angle.

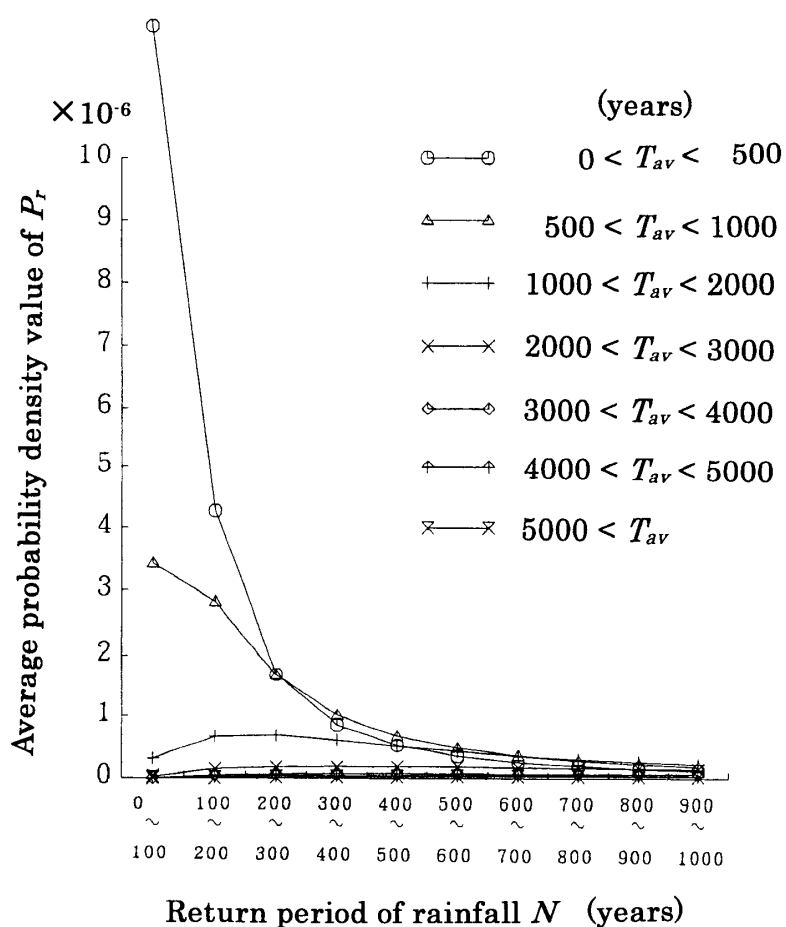


Fig. 8. Average probability density values of P_r of all grid cells for every class of return period of rainfall and for every class of T_{av} , where T_{av} is the average recurrence interval of shallow landsliding.

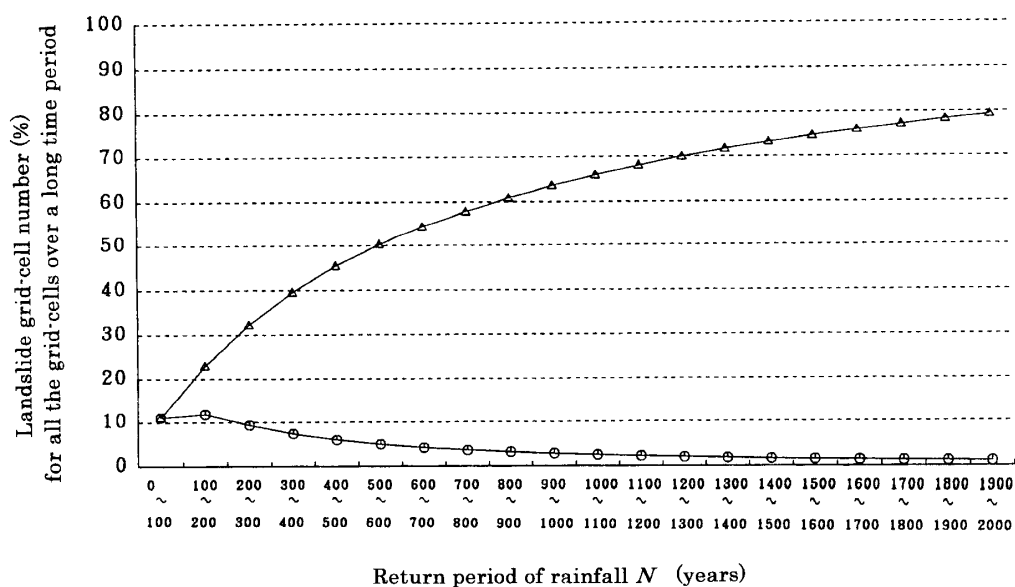


Fig. 9. The frequency and the cumulative curve of return periods of rainfalls that cause the shallow landslides for all the grid cells over the long term.

6. ま と め

以上、崩壊を発生させる降雨の再現期間について理論的な検討を加えたが、その確率密度 P_r やその最大値を与える降雨の再現期間 N_{max} に関して以下のことがわかった。

免疫性がない場合：

- (1) 崩壊を発生させる降雨の再現期間を N_0 とすると、 P_r は以下の式で示される。

$$\begin{aligned} P_r &= 1 / N^2 & (N > N_0) \\ &= 0 & (N < N_0) \end{aligned}$$

- (2) 崩壊に最も効果的な降雨の再現期間 N_{max} は崩壊を発生させる最小の再現期間 N_0 および崩壊の平均再現期間 T_{av} に等しい。

免疫性がある場合：

- (3) $n(i)$ を定常的な土層年齢頻度分布とすると、 P_r は以下の式で示される。

$$P_r = \sum_{i=i(N)}^{\infty} n(i) / N^2$$

ただし、 $i(N)$ は再現期間 N 年の降雨が限界降雨量となる土層深に対応した土層年齢である。これを島根県浜田市の試験地に適用した結果、以下のことがわかった。

- (4) 崩壊に最も効果的な降雨の再現期間 N_{max} は崩壊の平均再現期間 T_{av} や傾斜 β に大きく影響される。
- (5) 一般に、崩壊に最も効果的な降雨の再現期間 N_{max} は平均再現期間 T_{av} と比較してはるかに小さい。
- (6) 試験地全体の長期間の崩壊を考えた場合、再現期間 500 年未満の降雨で約 50 %、また再現期間 1000 年未満の降雨で約 65 % の崩壊が発生する。

以上、長期的にみた場合の崩壊に効果的な降雨の再現期間に関して、本稿はひとつの見通しを与えたものと思われる。ただし、免疫性がある場合の解析の基礎となる降雨の発生確率（確率降雨強度式）は、気象庁浜田測候所の過去 100 年程度の実測データにある分布式をあてはめて得られたものであり、その外挿より得られる数 100 年以上の再現期間の精度や適応範囲については検討が必要である。したがって、特に (6) の結論の数値については現時点でのたたき台として捉える必要がある。さらに、言うまでもなく、免疫性がある場合の解析結果は、地形や土層の力学特性だけでなく土層の成長速度など、今回適用した試験地の特性が反映されたひとつの事例にすぎない。崩壊に効果的な降雨の再現期間に関する一般的な検討は今後の課題としたい。

謝 辞

本研究は、元東京都立大学理学部教授・現日本大学理学部教授の野上道男氏により指摘された問題提起を契機としてまとめたものです。また、本研究を進めるにあたり、元京都大学防災研究所の奥西一夫教授には討論を通して有意義な指摘をいただきました。末筆ながら両先生に深く感謝申し上げます。

引 用 文 献

- Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M., and Montgomery, D. R. (1995) A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data: *Hydrological Processes*, **9**, 383-400.
- 羽田野誠一 (1968) 地すべり性大規模崩壊と地形条件 —和歌山県有田川上流の事例—: 第5回災害科学総合シンポジウム論文集, 209-210.
- 平野昌繁・大森博雄 (1989) 土砂移動現象における規模・頻度分布特性とその地形学的意義: *地形*, **10**, 95-111.
- 飯田智之 (1993) 表層崩壊の免疫性と崩壊確率モデル: *地形*, **14**, 17-31.
- 飯田智之 (1996) 土層深頻度分布からみた崩壊確率: *地形*, **17**, 69-88.
- Iida, T. (1999) A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm: *Catena*, **34**, 293-313.
- 飯田智之 (2000) 降雨確率と表層崩壊確率に関するシミュレーションによる検討 (1) —土層深による免疫性を考慮した降雨量と表層崩壊の関係—: *地形*, **21**, 1-16.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding: *Water Resources Research*, **30**, 1153-1171.
- 守屋以智雄 (1972) 崩壊地形を最小単位とした山地斜面の地形分類と斜面発達: 日本地理学会予稿集, **no. 2**, 168-169.
- 清水 収・長山孝彦・斉藤政美 (1995) 北海道山地小流域における過去 8000 年間の崩壊発生域と崩壊発生頻度: *地形*, **16**, 115-136.
- 下川悦郎 (1983) 崩壊地の植生回復過程: *林業技術*, 496, 23-26.
- Shimokawa, E., (1984) A natural recovery process of vegetation on landslide scars and landslide periodicity in forested drainage basins: *Proc. Symp. Effects of Forest land Use on Erosion and Slope Stability, Hawaii*, 99-107.
- Sidle, R.C., (1987) A dynamic model of slope stability in zero order basin. *IAHS publ.* **165**, 101-110.
- 鈴木雅一・福島義宏・武居有恒・小橋澄治 (1979) 土石流災害発生の危険雨量: *新砂防*, 110, 1-7.
- Wolman, M.G. and Miller, J.P. (1960) Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes: *Jour. Geol.*, **68**, 54-74.
- 柳井清治 (1989) テフクロロジーによる北海道中央部山地斜面の年代解析: *地形*, **10**, 1-12.
- 吉木岳哉 (1997) 斜面の地形分類と編年に基づく湿潤温帯山地・丘陵地の気候地形発達史: 東北大学理学研究科学学位論文, 205 pp.
- 吉永秀一郎・西城 潔 (1989) 北上山地北部の完新世における百年・千年オーダーの斜面変化: *地形*, **10**, 285-301.