

招待論文
INVITED
PAPER

招待論文 土石流の発生とその予測 OCCURRENCE OF DEBRIS FLOW AND ITS P

OCCURRENCE OF DEBRIS FLOW AND ITS PREDICTION

平野宗夫

Muneo HIRANO

正会員 工博 九州大学教授 建設都市工学科
(〒812 福岡市東区箱崎)

Key Words : debris flow, occurrence criteria, prediction, neural networks, volcanic debris flow

1. はじめに

土石流は主に山間部で発生し、継続時間も短いため目撃例が少なく、かつては幻の土石流と呼ばれていた。しかし、最近では雲仙・水無川の土石流の生々しい流動状態がテレビで放映されるなど、実態が広く知られるようになった。近年治水工事の進捗により、洪水などの豪雨災害による犠牲者の数は1950年代と比較すると激減しているが、反面豪雨災害による犠牲者の大部分が土石流などの土砂災害に起因しており、土石流災害に対する安全性の向上が急務となっている。

土石流は破壊力が大きいためハードな対策には限界があり、人命を守るための警報避難体制の整備が必要な場合が多い。予警報のための土石流の発生限界豪雨に関しては、従来から種々の方法が提案されており、累加雨量と直前の雨量によって発生と不発生とを区分する手法¹⁾などが一部で実用に供されている。しかし、これらの多くは物理的根拠に乏しく信頼性は不充分である。土石流のように物理機構が複雑な現象を誤差のあるデータから予測するには、入力と出力のデータからシステムを推定する手法が有効である。また、一般に土石流は発生頻度が低いので、データが乏しいのが普通であるから、予測システムを作る場合には、その後のデータによりシステムを修正する自己学習機能を持たせることが望ましい。ここではこのような観点から、降雨から土石流の発生を予測する手法とその意義について述べる。

2. 十石流の発生限界降雨

(1) 発生限界降雨に関する理論

図-1に示すように、厚さ D 、長さ l 、勾配角 θ の斜面に強度 r の降雨があり、浸透流と表面流が発生している場合を考える。

図において、表層から a の深さの点におけるせん断力 τ_s と抵抗力 τ_h は、それぞれ次式で表される²⁾。

$$\tau_L = c + C_* (\sigma - \rho) a q \cos \theta \tan \phi \dots \quad (2)$$

ここに、 C_* は堆積物の濃度、 σ および ρ は砂礫および水の密度、 g は重力の加速度、 c は土砂の粘着力である。

土石流の発生限界は $\tau = \tau_L$ であるから、上記 2 式より
土石流発生限界勾配 A_c は下式のようになる。

$$\tan \theta_c = \frac{c/(\rho g a \cos \theta_c) + C_*(\sigma/\rho - 1) \tan \phi}{C_*(\sigma/\rho - 1) + 1 + h_c/a} \quad \dots \dots \dots (3)$$

上式を満足する勾配において、深さ a より上層の土砂が移動することになるが、 a が堆積物の粒径 d より大きい ($a \geq d$) ことが必要である。また、水深 h_0 が a より大きい ($h_0 \geq a$) とき粒子が流動層全体に分散されて土石流となる²⁾と考えられる。そこで、 $a=d=h_0$ とし、通常の土砂における値 $C_* = 0.6$, $\tan\phi = 0.8$, $c = 0$ および $\sigma/\rho = 2.65$ を式 (3) に代入すると、 $\theta_c = 14.8^\circ$ となり、実際の土石流が 15° 以上の勾配で発生しているという経験的事実に一致する。

芦田ら³⁾は $h_0 = d/\kappa$ となる流量を限界流量と考え、溪流における土石流の発生条件として次式を与えており、

$$Q_c = \sqrt{\frac{8 \sin \theta}{f_0 K^3} B^2 g d^3} \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに、 Q_c は発生限界流量、 f_0 は摩擦損失係数、 κ は土石流流量厚と表面流水深との比で 1 に近い値、 θ は渓床勾配、 B は川幅、および d は堆積物の粒径である。

上式に合理式を適用すると、発生限界降雨は次式で与えられる

$$r_T = \frac{1}{T} \int_0^T r dt \geq \frac{Bd}{fA} \sqrt{\frac{\sin\theta}{\epsilon_{\text{ref}}^3} gd} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここに、 r_T は T 時間内の平均降雨強度、 T は到達時間、 τ は降雨強度、 A は流域面積、および f は流出係数である。

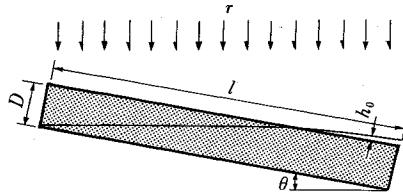


図-1 斜面のモデル

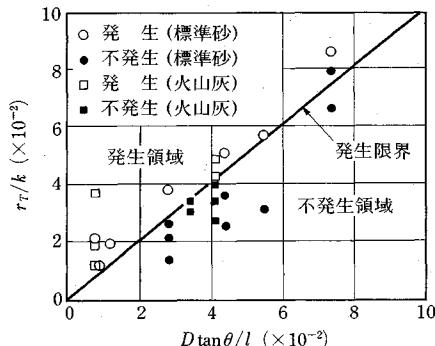


図-2 土石流発生限界降雨の検証

実際の堆積物の表面は図-1に示されるように滑らかではなく、少なくとも粒径の数倍程度の凹凸が存在する。このため、斜面や河床の広い範囲にわたって $d=h_0$ という条件が満たされたることは現実にはありえず、局所的に表面流が発生して崩壊が始まることになる。したがって、勾配が 22° 程度以下の場合には、表面流の発生を土石流発生条件とみなしてよい。

浸透流に関して連続の式と Darcy の式を適用し、表面流発生（すなわち土石流発生）条件を求めるとき次式が得られる。

$$l \geq k T \sin \theta / \lambda \quad (6)$$

および

$$\lambda D \leq \int_{t_0}^t r \cos \theta dt \quad (7)$$

ここに、 D は堆積層の厚さ、 l は斜面長、および $\lambda=1-C_*$ である。上記 2 式より

$$r_T = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T r dt \geq \frac{Dk}{l} \tan \theta \quad (8)$$

上式を人工降雨装置を用いた水路実験結果^{4),5)}に適用してものが図-2 であり、発生と不発生の限界をよく示している。

式(3)において、 $h_0=0$ とし、前記の諸値を代入すると $\theta_c=21.7^\circ$ となり、これ以上の勾配では表面流が発生する前に土石流が発生する可能性がある。浸透流の水深 H が堆積物の厚さ D より小さい場合について限界状態における水深 H_c を導くと⁶⁾

$$\frac{H_c}{D} = \frac{c/(\rho g D \cos \theta_c) + C_*(\tan \theta - \tan \phi) \sigma/\rho}{\tan \theta + C_*(\tan \theta - \tan \phi)} \quad (9)$$

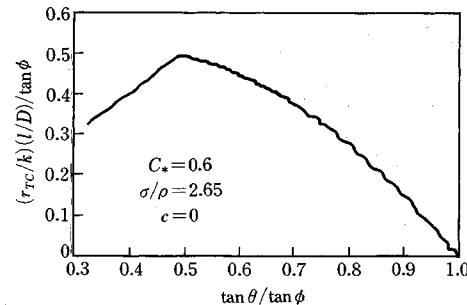


図-3 発生限界降雨と斜面勾配

となる。

浸透流の水深 H が H_c に等しくなったとき崩壊が発生するとすると、発生条件は下記のように導かれる。

$$r_T = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T r dt \geq \frac{H_c k}{l} \tan \theta \quad (10)$$

式(9) および式(10) より、土石流発生限界降雨と勾配の関係を求めて図示すると図-3 のようになる。

式(5) と式(8) および式(10) は対象も式誘導の過程も異なるが、いずれも到達時間内の平均降雨強度がある値を超えると土石流が発生することを表している。これら各式の右辺をそれぞれ渓流および斜面に固有の値を考えると、土石流の発生は到達時間とその間の雨量によって規定されることになる。

3. 土石流の流出解析

降雨から流出量を推算する手法として、合理式が広く用いられている。また、流出解析に関しては、単位図法、貯留閑数法をはじめ多くの手法が提案され実用に供されている。これに対して土石流に関しては、現象が複雑でかつ精度のよいデータが少ないことなどのため、降雨から流出量を推定する信頼性のある手法はまだ確立されていない。ここでは、斜面における降雨と水および土石流の関係を明らかにし、水と土石流の流出を統一的に表示するモデルについて述べる。

(1) 流出係数

降雨の流出における流出係数 f は流出高と降雨強度の比、すなわち、

$$f = \text{流量} / (\text{降雨強度} \times \text{流域面積}) \quad (11)$$

で定義される。これに対して、土石流の流出の場合は、流出の生じている場は流域の一部であるから、流出係数 f は、流量と (生起場の面積 × 降雨強度)との比に生起場の割合を掛けたものとして、下記のように表すことができる。

$$f = \frac{\text{流量}}{\text{降雨強度} \times \text{土石流生起場の面積}} \times \frac{\text{土石流生起場の面積}}{\text{流域面積}} = f_s F \quad (12)$$

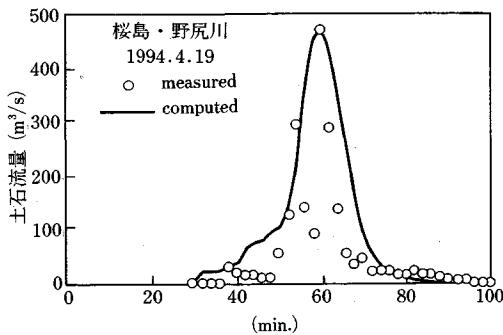


図-4 実測値と計算値の比較

示される。

ここに、 $M = \frac{f_s}{(f_s-1)\lambda} \int_{kts \sin \theta / \lambda}^{\infty} \phi(\eta_0, l) dl$ および $R(T) = \eta_0 = \int_0^t r \cos \theta dt$ である。

最近、歐ら⁹⁾は、土石流のピーク流量に関して下記のような経験式を提案している。

ここに、 q_b は土石流のピーク比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)、 α は定数、 γ_m は土石流の単位堆積重量 (t/m^3)、 P_a は前期有効雨量 (mm)、 P_m は一連の降雨の累積値 (mm)、 i_{10} は最大 10 分雨量 (mm)、 m_1 、 m_2 、 m_3 および m_4 は指数である。彼らは降雨のタイプ等によって 4 つの式を提案している。式 (28) は左辺と右辺の次元が一致していないので物理性に乏しく一般性にも欠けるが、累積雨量と最大 10 分雨量の指数の範囲は $m_3 = 0.67 \sim 0.84$ および $m_4 = 0.81 \sim 1.09$ で 1 に近い値であり、式 (27) を裏付けるものになっている。

式(27)を直前の降雨強度 r と累加雨量 R を両軸とする平面上にあらわすと、図-4に模式的に示すように、 $Q/AM = \text{const.}$ の線が双曲線になる。従来から発生限界を、直前の雨量と累加雨量を両軸とする平面上に双曲線状の曲線で表す手法が多用されているが、この手法は発生限界というより、規模の予測に適した手法といえる。芦田ら³⁾は、小豆島、木津川上流および仁淀川災害に対して、雨量強度と累積雨量を両軸とする平面上に「災害多発」と「崩壊危険」に相当する2本の曲線を表示しているが、これも規模の予測と見なすことができる。

4. 土石流発生の予測手法

前述のように、土石流の発生限界が式(5)、(8)または式(10)により表されるとすると、これらの式に含まれる水理、地形、地質などに関する諸量がわかれば、発生限界降雨強度を求めることが原理的には可能である。

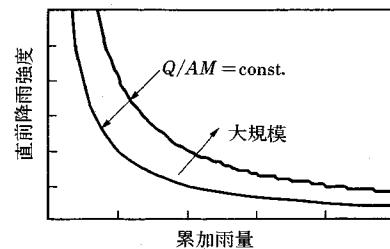


図-5 土石流の規模の予測図

る。しかし、いかに詳細な現地測定を行っても、全ての量を必要な精度で測定することは困難であり、そのようにして求められた発生限界は実用には程遠いものとなる。たとえば、式(8)には透水係数 k が含まれているから、限界降雨の推定精度は透水係数の現場測定のそれと同じとなり、実用に耐え得ないであろう。このような場合には、入力としての降雨波形と出力としての土石流発生・不発生のデータから発生限界を推定する、システム解析的な手法が有効である。

(1) 到達時間と限界雨量の推定

到達時間と限界雨量をデータから推定するために、まず一連の降雨のデータから次式で定義される種々の時刻と時間に対応する累加雨量 $R(t, \tau)$ を求める。

ここに, t は時刻, よび τ は時間である. 次に, 種々の時刻における $R(t, \tau)$ の最大値 $R_m(\tau)$ を求める. これを土砂災害の発生したものとそうでないものに分け, $R_m(\tau)$ と τ の関係をグラフにプロットする. 理想的な場合, すなわち, データに誤差が無く, かつ到達時間と限界降雨が一義的に決まっている場合には, 図-6 (a) に示される平面上において, 発生の場合はすべての線が発生限界点 R_c の上を通り, 不発生の場合は同点の下を通ることになる. したがって, 発生の下限と不発生の上限を描くと図-6 (a) に示されるような 2 本の曲線になるはずである. しかし実際には, 雨量データには誤差があり, 土石流の発生は確率現象であると考えられるから同図 (b) のようになり, 両者の差が極小になる点が到達時間と限界雨量を示すと考えられる⁸⁾.

(2) 雪仙岳における土石流の発生限界降雨

92年の資料を用いて、土石流の発生時と不発生時の累加雨量を描き、土石流発生の下限と不発生の上限をプロットすると図-7がえられる。図-6を参照すると、水無川における到達時間は1時間程度と推定される。また、1時間雨量が9mmを越えると土石流発生の可能性が生じ、14mmを越えると必ず土石流が発生していることが分かる。91年についても、ほぼ同様な結果（時間雨量7mmで土石流発生の可能性が生じ、15mmを越えると必ず土石流が発生）¹⁰⁾が得られており、92年に

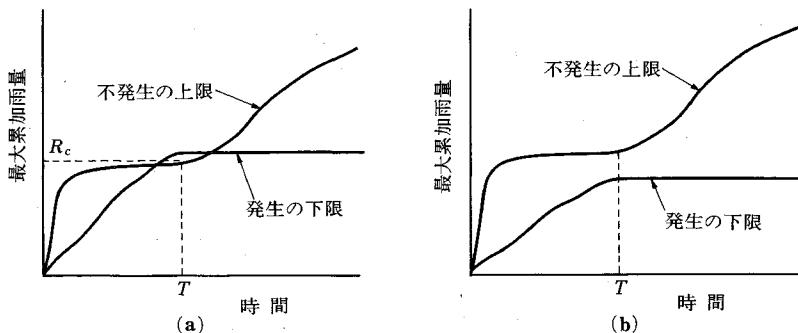


図-6 発生の下限と不発生の上限の模式図

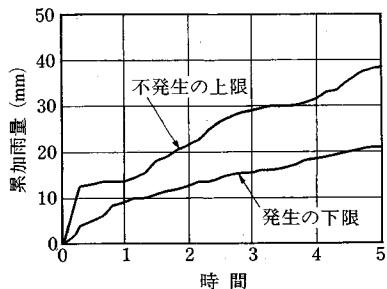


図-7 発生の下限と不発生の上限 (92年雲仙・水無川)

なっても土石流の発生状況に顕著な変化は認められない。桜島においては、40分雨量7~13mmが土石流の発生限界となっており⁸⁾、同程度の値となっている。上記の手法は、雲仙などの火山性土石流だけでなく、一般的の土石流や山崩れの発生予測にも有効であると考えられる。

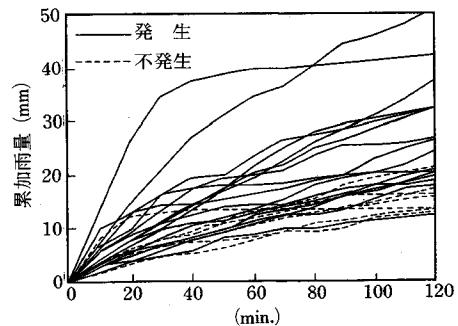
(3) ニューラルネットワークを利用した土石流発生予測

土石流と降雨に関するデータが整備されていれば、上述のような手法により予測システムを構築することが可能である。しかし、一般には土石流の発生頻度は低いからデータは不十分であり、実際の警報基準の設定は低めにせざるを得ない。そのため、警報装置はしばしば空振りを犯すことになり、住民の信頼を失わせる一因となっている。したがって予測システムには、豪雨の度にデータを取り込んでパラメータを修正していく自己学習的な機能をもたせることが必要である。この目的でニューラルネットワークを利用した土石流発生予測¹¹⁾を試みた。

a) ニューラルネットワークの構成

ニューラルネットワークは、生物の脳の機能をモデル化した情報処理システムであり、外部環境に合うように自己を変化させて調整する自己学習が可能である。ネットワークの最小単位はユニットと呼ばれる多入力1出力の素子で、他のユニットとシナプスにより結合して、ネットワークを形成する。

ここで用いたネットワークの構造は、入力層、中間層

図-8 発生と予測した降雨 (92年雲仙・水無川)
(実線は的中、破線は外れ)

および出力層の3層からなる階層型ニューラルネットワークで、ユニットからの出力は一方向にのみ伝わる。入力層の各ユニットに入力された値は応答関数により変換されて全ての中間層へ向かって出力される。これに各ユニット間に付けられている重みを乗じたものが中間層への入力値として入力される。中間層と出力層の間においても同様の処理が行われ、最終的に出力層から出力される。これに教師信号を与え、ネットワークの出力信号と教師信号の差を小さくするように、出力層から入力層へユニット間の結合荷重を調整していく。この過程を繰り返すことにより、最適なネットワークに改良される。これが学習であり、学習が終了したネットワークにデータを入力し、それに対するネットワークの出力信号により予測を行う。

b) 雲仙・水無川土石流への適用

上述の手法を雲仙の水無川に適用した例を以下に示す。91年5月の資料を教師信号（土石流発生の場合0.990、不発生の場合0.010）として与えてニューラルネットワークを構築させ、その後の雨量資料を入力として出力を求めた。入力データとしては、雲仙気象台の雨量記録から10, 20, ..., 120分の10分間隔の累加雨量を用いた。それによると、出力が0.90以下の場合はすべて土石流が発生していなかった。したがって、この場合は出力値0.90を発生予測の基準とすることができるよ

う。図-8は92年の降雨で出力が0.90以上となった場合の累加雨量を示したものであるが、これを発生と予測したとすると図の実線は的中、破線は外れることになる。すなわち、発生と予測した降雨は24個で、そのうち的中は17個、外れ（空振り）は7個、的中率は71%である。また、出力が0.90未満で発生したものはないから、見逃しは0である。91年の資料についての同様の計算¹⁰⁾によると、91年6月～11月について発生予測の的中は24個中13個、空振り11個での的中率54%であり、見逃しは0であった。これらの結果より、土石流の発生予測にニューラルネットワークが有効であること、土石流の発生限界については92年と91年の間で顕著な差が認め難いことなどが示された。

5. 土石流予測の問題点

(1) 予測手法の分類と問題点

降雨の土石流発生・不発生に関する資料から予測モデルのパラメータを決める方法としては、上述の他にも従来からいくつかの手法が提案されている。

a) 予測手法の分類

前述の観点から、予測手法は次のように大別できよう。

(1) 累積雨量や実行雨量がある限界値を超えたとき発生するとするもの。

式(5)および式(8)は流出における合理式と同形であり、それぞれ洪水流出および中間流出に対応している。したがって、土石流の崩壊の予測に単位図法やタンクモデルを利用することも意味のあることであろう。細分すると下記のようになる。

累積雨量：平野ら（1976）⁴⁾、石原ら（1977）¹²⁾、芦田ら（1978）³⁾

実効雨量：鈴木・小橋（1981）¹³⁾

タンクモデル：鈴木ら（1979）¹⁴⁾、道上ら（1980）¹⁵⁾

これらの手法では、発生限界は限界量と時定数で定義される。限界量は雨量やタンクの水位、時定数は到達時間Tや低減係数αである。

(2) 直前降雨強度と累積雨量（または実効雨量）で予測するもの。

芦田ら（1978）³⁾、平野ら（1986）⁸⁾、

建設省指針B案（1984）¹¹⁾、矢野（1990）¹⁶⁾

(3) stochasticな手法

ニューラルネットワークの利用：森山ら（1992）^{11), 17)}

b) 従来の手法の問題点

上記の「実効雨量」R(t)は次式で定義される¹³⁾。

$$R(t) = \int_0^t e^{-\alpha t} r(t-\tau) d\tau \quad \dots \dots \dots (30)$$

これは、直前の雨量ほど影響が大きく時間を遡るにつれて影響が小さくなるということを表すために導入されたもので、感覚的に納得し易く、雨の降り始めをどこに

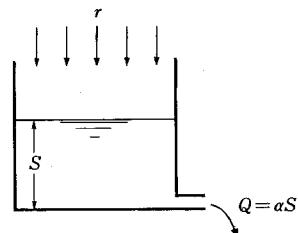


図-9 1段線型貯水池モデル

とるかという厄介な問題も避けられるため、建設省の指針に取り入れられるなど多用されている。式(30)は応答関数として $e^{-\alpha t}$ を用いたことになり、線型応答関数モデル（単位図法）の一種である。類似のモデルとして図-9に示す1段の線型貯水池モデルがあり、その応答関数（瞬間単位図）は周知のように $\alpha e^{-\alpha t}$ である。したがって、「実効雨量」は幅が $1/\alpha$ の1段線型貯水池モデルに相当する。これは、式(30)を考える際に連続の式が考慮されていないことによるものであり、そのためタンクの流出孔を小さく（ α を小さく）するとタンクの幅が広がるという奇妙なモデルになっている。連続の式を満足していないというのは論外であり、応答関数としては、その性質上 $e^{-\alpha t}$ ではなく、 $\alpha e^{-\alpha t}$ とすべきである。

また、直前の雨量と累積雨量を両軸とする平面上で発生と不発生の領域を直線で区分する手法がしばしば用いられているが、累積雨量として1時間前までの累加雨量（または実効雨量）^{11), 16)}としたものが少なくない。しかし、累積雨量を1時間前で分けて二つのパラメータとすることは物理的に無意味であるばかりでなく、以下にのべるように、数学的にもきわめて不合理である。

時刻tにおける時間雨量をr(t)、累積雨量をR(t)とすると、定義から

$$R(t) = r(t) + R(t-1) \quad \dots \dots \dots (31)$$

であり、発生限界をR(t)=R_cとすると、上式は

$$r(t) = -R(t-1) + R_c \quad \dots \dots \dots (32)$$

と書ける。したがって発生限界は、縦軸をr(t)、横軸をR(t-1)とする平面上において-1の傾きをもつ直線で表され、そのy切辺がR_cとなる。直線の傾きが-1でない場合および前述の実効雨量を用いる場合は

$$r(t) + a_1 r(t-1) + a_2 r(t-2) + \dots = R_c \quad \dots \dots \dots (33)$$

と書くことができ、線型結合表示になる。これは単位図法にはかならない。累積雨量として累積雨量や実効雨量を1時間前で分けて二つのパラメータにすることは、1次元のものをわざわざ2次元で扱うことであり、後の運用を非常に複雑にする。いたずらに現場を混乱させるだけのこのような手法は早急に改めるべきであろう。

(2) 予警報の問題点

住民の生命を護るために災害の発生予測に基づく避難体制の整備が重要である。しかし、土石流や崖崩れ

は、力学的バランスが崩れたときに突発的に発生する現象であるから、予測は難しく、確率的にならざるをえない。したがって、警報や避難要請に関しては、それを出す側とその受け手の双方に確率予測についての充分な認識がないと、有効な対応ができないばかりか、有害な場合すらあるように思われる。たとえば、ある事象の発生確率が10%になったとしよう。それが人命にかかるようなものであれば、それは避難するに充分高い確率である。しかし、10%の確率で出された警報は90%の確率ではされることになる。したがって、警報や避難命令は、重大な災害になればなるほど当たる確率が低くなるという必然性を有することになる。

一方、はずれることを前提にすれば、警報の発令は少ない方がよい。年中出されていつもはずれる予測は誰も信用しないが、稀に出されたものであれば、はずれてもあまり文句は出ないであろう。したがって、予警報に関しては、命中率を上げることもさることながら、避難命令の頻度を小さくするという観点からの研究が必要であるように思われる。

6. おわりに

降雨から土石流の発生を予測する手法について述べた。雨水の流出に関しては、システム解析としての流出解析法が確立されており、制御理論を利用したオンライン予測手法なども実用に供されている。しかし、土石流については資料が不足していることもあり、システム解析や stochastic な手法を取り入れた例は極めて少ない。土石流や土砂流出のように誤差の多い現象を取り扱うには stochastic な手法が有用であり、その砂防工学への導入が強く望まれる。本文がその一助となれば望外の幸せである。

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部：総合土石流対策（II），土石流災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針（案），1984.
- 2) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 20 号，B-2, pp. 405~435, 1977.

- 3) 芦田和男・高橋 保・沢井健二：土石流の危険度の評価方法に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 21 号，B-2, pp. 423~440, 1978.
- 4) 平野宗夫・岩元 賢・原田民司郎：人工降雨による土石流の発生機構に関する研究，第 31 回土木学会年次学術講演会概要集，pp. 299~301, 1976.
- 5) 斎田 誠：活火山における土石流の流出予測に関する研究，九州大学学位論文，1988.
- 6) 例えば、土木学会編：土木工学ハンドブック上巻，第 5 編土質力学，技報堂，1974.
- 7) 平野宗夫：山地小河川における流出過程について，土木学会論文報告集，第 308 号，pp. 69~76, 1981.
- 8) 平野宗夫・斎田 誠・森山聰之：活火山流域における土石流の発生限界と流出規模の予測，第 30 回水理講演会論文集，pp. 181~186, 1986.
- 9) 欧 国強・唐 邦興・小橋澄治・水山高久：土石流ピーク流量の統計的予測に関する研究，新砂防，第 44 卷，第 2 号，pp. 14~21, 1991.
- 10) 平野宗夫・森山聰之・岩元 賢：土石流の発生限界降雨と発生予測，1991 年雲仙における土石流の調査研究，文部省科学研究費突発災害調査研究成果，No. B-3-1, pp. 9~14, 1992.
- 11) 森山聰之・平野宗夫・上松泰介・川原恵一郎・白河朋道：ニューラルネットワークを用いた土石流発生予測について，水工学論文集，第 36 卷，pp. 705~708, 1992.
- 12) 石原安雄・友杉邦雄・小葉竹重機・下島栄一：降雨特性と土砂くずれの予測について，自然災害資料解析，4, pp. 101~106, 1977.
- 13) 鈴木雅一・小橋澄治：がけ崩れ発生と降雨の関係について，新砂防，Vol. 34, No. 2 (121), pp. 16~26, 1981.
- 14) 鈴木雅一・福 義宏・武居有恒・小橋澄治：土砂災害発生の危険雨量，新砂防，110, pp. 1~7, 1979.
- 15) 道上正規・小島英司：豪雨によるがけ崩れ発生の予知について，第 17 回自然災害科学シンポジウム講演会論文集，pp. 131~134, 1980.
- 16) 矢野勝太郎：前期降雨の改良による土石流の警報・避難基準雨量設定手法の研究，新砂防，Vol. 43, No. 4 (171), pp. 3~13, 1990.
- 17) 森山聰之・平野宗夫：降水レーダーとニューラルネットワークによる土石流発生予測について，第 47 回土木学会年次学術講演会概要集第 2 部，pp. 56~57, 1992.

(1994.1.24 受付)