

雲仙・水無川における土石流の流出特性とその変化

Characteristics of Debris Flow at the Mizunashi River in Mt. Unzen

平野 宗夫^{*1}・橋本 晴行^{*2}・川原恵一郎^{*3}

By Muneo HIRANO, Haruyuki HASHIMOTO

and Kei-ichiro KAWAHARA

Unzen volcano began to erupt in November 1990 after 198 years of dormancy and was in violent activity. Continuous growth of lava dome and falls of lava rocks resulted in frequent pyroclastic flows. As a great volume of volcanic material deposited and scattered by the pyroclastic flows, debris flows frequently occurred along the Mizunashi River and damaged many houses in 1991-93. In 1995, the volcanic activity has become calm and no pyroclastic flow has been observed from March, 1995.

With the change of the volcanic activity, the occurrence condition of debris flow is expected to change. The result of the data analysis indicates the abrupt change in the critical rainfall for occurrence of debris flow in July, 1993. The relation between rainfall and runoff of debris flow is also changed in the same period of the time.

Key words: debris flow, volcanic disaster, critical rainfall, Unzen Volcano

1. はじめに

雲仙・普賢岳は1990年11月に噴火を開始し、翌年5月から普賢岳を水源とする水無川で土石流が頻発するようになった。特に93年には相次ぐ大雨により大規模な土石流が続発し、大量の土砂が流出して多数の家屋が全壊する大災害となった。しかし、94年は一転して記録的な渇水となったため、被害を出すような土石流の発生はなく、95年も被災家屋は生じていない。

一方、火山活動は95年に入って鎮静化し、2月中旬以降は火砕流は発生せず、溶岩丘の成長も停止したままである。火砕流や溶岩丘の崩落による新規の土砂供給がないと、土石流の流出特性は変化し、このまま火山活動が終息すると、土石流流出の頻度と規模は次第に減衰して行くことが予想される。このような火山活動の推移にともなう流出特性の変化過程を明らかにすることは、火山地域の防災上重要な課題の一つである。

2. 水無川における土石流の発生限界降雨とその変化

土石流の発生限界降雨は、到達時間とその間の雨量によって規定される¹⁾。水無川における土石流の発生限界については、91-92年の資料から、91年については到達時間は1時間程度で、1時間雨量が7mmを越えると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していること、92年もほぼ同様な値を示しており、92年になっても土石流の発生状況に顕著な変化は認めがたいこと、などが明らかにされている^{2)、3)}。これらは、雨量資料として91-92

^{*1} 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

^{*2} 正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科

^{*3} 学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科水工土木学専攻

(〒812 福岡市東区箱崎6-10)

年の雲仙測候所の10分雨量を使用し、土石流の発生・不発生は、九大地震火山観測所の地震計の波形記録から判断して、土石流の発生時と不発生時の累加雨量を描くことにより、求められたものである。

同様の手順により、94年-95年7月の降雨について検討する。雨量資料としては雲仙測候所の10分雨量を使用し、雲仙測候所の地震計の記録から土石流波形と判断された時の降雨を土石流発生降雨とする。これらの資料から累加雨量の最大値を求めてプロットすると図-1のようになる。

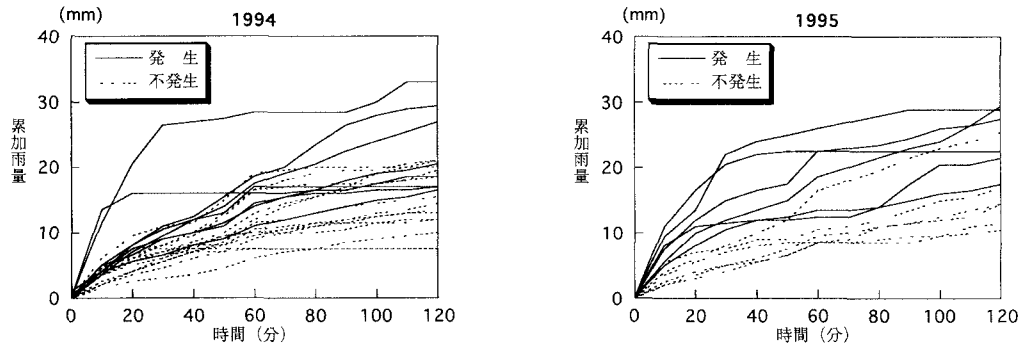


図-1 土石流発生及び不発生時の累加雨量

上図から、土石流発生時の下限と不発生時の上限を描くと図-2がえられる。同図において、上下限の線の差が極小となる点が到達時間に相当する⁴⁾と考えられる。図から、到達時間は40分程度と推定されるが、この値はニューラルネットワークによる検討結果⁵⁾と一致する。また、40分間の雨量が8mmを超えると土石流発生の可能性が生じ、12mm以上では必ず発生していることがわかる。これらは桜島・長谷川における到達時間40分、限界雨量7~13mm⁴⁾とほとんど同じ値となっている。また60分雨量をみると、下限10mm、上限18mmとなっており、91-92年に比し若干発生限界が高くなっているように思われる。

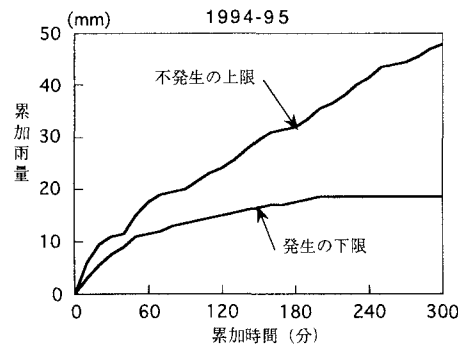


図-2 土石流発生の下限と不発生の上限

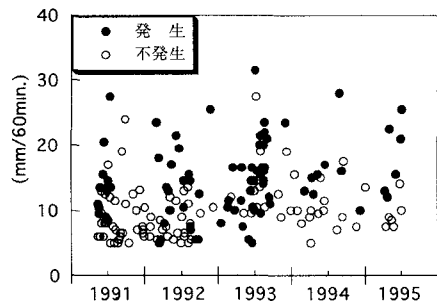


図-3 60分雨量と土石流発生

91年2月から95年7月4日までの雲仙測候所の10分雨量データから、土石流が発生した場合及び最大時間雨量が5mmを超える降雨を取り出し、60分雨量を時系列で示すと図-3のようになる。土石流の発生は、雲仙測候所の地震計の記録から判断されたものであり、土石流発生の場合の雨量は、振動波形の始まりの時刻から60分前迄の降雨量をとっている。図によると、93年7月を境に、発生の下限が1時間5mm程度から10mm程度に増大している。

一方、雲仙普賢岳における火砕流の発生回数の推移を示すと図-4のようである。それによると、93年には火山活動はまだ衰えていず、93年7月以降の土石流発生限界の変化が、火山活動の衰退に起因するものとは考え難い。また、長崎県及び建設省で測定された水無川における土石流の流出土砂量を時系列で示すと図-5のようであり、93年6-7月に大量の土砂が流出したことを示している。発生限界の変化はこの大量の流出に続いて起こっており、この相次ぐ豪雨で大量の不安定土砂が流出したことが、その後の流出の場の変化をもたらしたものと考えられる。

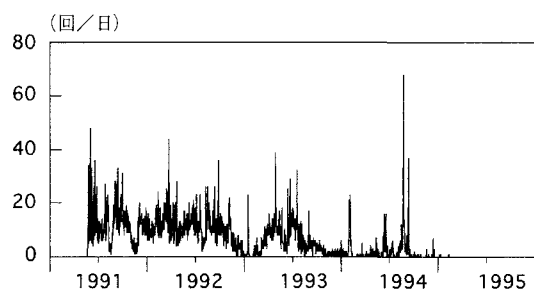


図-4 火砕流発生回数（雲仙所測候所による）

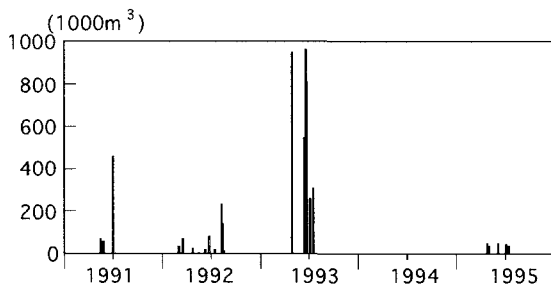


図-5 水無川の流出土砂量

3. 土石流流出の特性

3.1 流出波形の特性

土石流の計測は、水無川、中尾川および湯江川において、著者ら⁶⁾により断続的に試みられており、いくつかの土石流、泥流について、表面流速と水位の実測値がえられている。水無川においては、92年5月から大南橋で観測が開始され、5-7月に小規模な泥流の流出波形がえられた。同年8月8日に発生した大規模な土石流では、計測器が被災したが、それまでの記録は得られている。しかし、河床堆積物が橋桁まで達したため、河床位置の推定が困難であること、すぐ上流で氾濫が起きていること、などのため、ハイドログラフの推定値には問題が多い。中尾川においては、93年に小規模な泥流について記録が得られている。

大規模な土石流については、水無川で93年6月12-13日の記録がえられている。これは、93年5月に水無川国道57号線橋梁に設置された計測装置によるものである。この装置は6月18日の土石流により、橋梁もろとも流失してしまったので、現在のところ規模の大きい土石流のデータとしては信頼できる唯一のものとなっている。データは30秒間隔で記録されているが、これから10分間平均流量を計算し、雲仙測候所の10分間雨量とともに示すと図-6 のようである。図において、流量波形は降雨波形とよい対応を示している。流出土砂量は30時間以上の降雨量との相関が高い⁷⁾ことが示されているが、瞬間的な流量は、短時間の降雨に規定されていることが分かる。そこで、10分流量と10分雨量の相互相関係数を計算すると図-7 のようになり、相関係数は20分でピークを示している。雲仙測候所によりえられた地震計に表れた土石流波形の始まり時刻と、検知線の切断時刻との差は9-27分となっており、この程度の値が流出の遅れ時間に対応しているものと思われる。

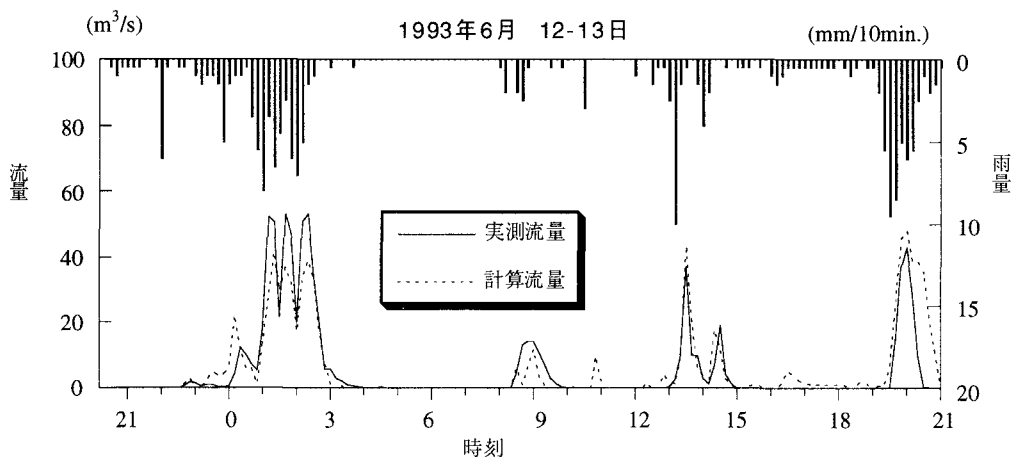


図-6 水無川土石流のハイドログラフとハイレグラ

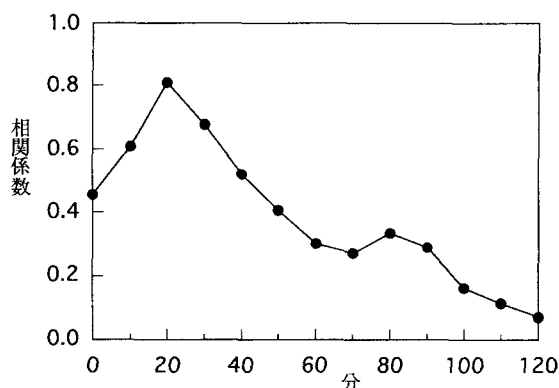


図-7 流量と雨量の相互相関係数

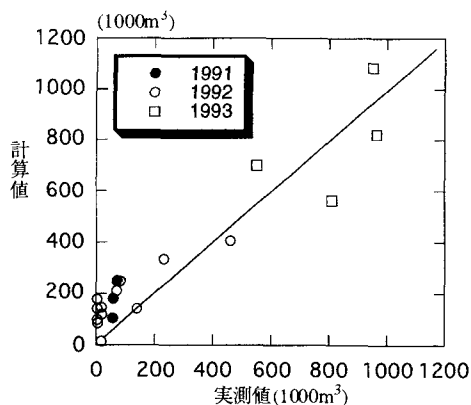


図-8 流出解析による流出量の計算値と実測値

3.2 ニューラルネットワークを利用した流出解析

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。ニューラルネットワークは降雨予測や流出解析など、水工学の分野でも広く使用されるようになった。土石流については、著者らにより、発生予測⁸⁾や流出土砂量の予測⁹⁾に有効であることが示されている。

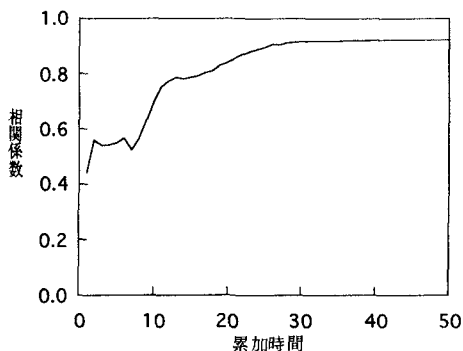
ここで用いるネットワークの構造は、入力層、中間層および出力層の3層からなる階層型ニューラルネットワークで、ユニットからの出力は一方にのみ伝わる。入力層の各ユニットに入力された値は、応答関数により変換されて全ての中間層へ向かって出力される。これに各ユニット間に付けられている重みを乗じたものが中間層への入力値として入力される。中間層と出力層の間においても同様の処理が行われ、最終的に出力層から出力される。これに教師信号を与え、ネットワークの出力信号と教師信号の差を小さくするように、出力層から入力層へのユニット間の結合荷重を調整していく。この過程を繰り返すことにより、最適なネットワークに改良される。これが学習であり、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。入力としては10分雨量を用いるが、前述のように遅れ時間が20分であることから、流量に対して20分ずらし、入力として20,30,・・・分前の雨量を用いる。教師信号としては図-6に示したハイドログラフを与える。これを学習すると予測システムが構築される。学習の結果は同図に点線で示されている。

上で同定した流出システムを用いれば、流出波形の予測が可能である。しかし、現在のところ、このモデルの検証に耐える精度のハイドログラフの実測値は得られていない。そこで、このモデルに10分雨量データを適用してハイドログラフを計算し、その総流出量を求めて図-5に示した実測値と比較する。結果は図-8の通りであり、1個のハイドログラフにより同定したにもかかわらず、予測値と実測値の適合性は良好である。

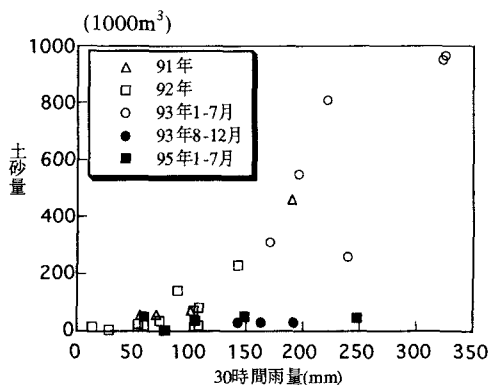
4. 水無川における土石流の流出土砂量

4.1 流出土砂量とその変化

91-93年の流出土砂量と各時間の累加雨量との相関係数を計算⁷⁾すると図-9のようになり、相関係数は累加時間とともに増加し、30時間以上ではほぼ一定値となっている。そこで、流出土砂量を30時間雨量に対してプロットすると図-10がえられる。図によると、93年7月までのデータはほぼ1本の線上にまとまっている。しかし、93年8月以降は、同年8月19日および9月3日、95年7月3日などかなりの降雨があったにもかかわらず、被害が発生するような土砂の流出は報告されていない。この間の流出土砂量について精度のよいデータはえられていないが、いずれもせいぜい数万 m^3 程度と思われる。したがってそれ以前に比べると、流出土砂はかなり少なくなっているようである。これは、図-3において発生限界が93年7月を境に急変していることと対応している。



図－9 流出土砂量と降雨の相互相関



図－10 流出土砂量と30時間雨量

このように、93年7月を境に土石流流出条件が大きく変化しているが、その原因としては、93年6月の相次ぐ豪雨で大量の不安定土砂が流出したことが考えられる。なお、95年3月以来、雲仙岳の火山活動は停止しているが、火山活動の衰退は土石流流出場の変化より遅れて起こっており、それが主因であるとは考え難い。

4.2 流出土砂量の推定

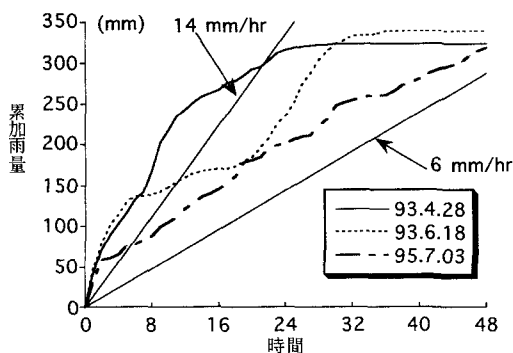
図－10に示されるデータのうち、総降雨量の多い93年4月28日（流出土砂量95万 m^3 ）、同年6月18日（同96.5万 m^3 ）及び95年7月3日（同約4万 m^3 ）の降雨について、各時間の累加雨量を求め、それぞれの時間に対応する最大値をプロットすると図－11のようになる。いずれも48時間降雨が300mmを超える大雨であるが、93年の両降雨ではそれぞれ100万 m^3 近くの土砂が流出して大災害になったのに対して、95年7月3日の流出土砂はわずかであった。このときの降雨は図－11に示すように発生限界以下の弱い強度の雨が長時間続いており、前2者に比べ降雨の集中度は低い。また、図－6によると、ハイドログラフのピークは短時間の降雨と強い相関を示している。したがって、土石流の流出量は長時間の総降雨量ではなく、集中度の強い降雨によって規定されるものと考えられる。

以上の考察に基づき、ある限界以上の降雨を有効降雨とし、有効雨量の合計と流出土砂量をプロットすると図－12のようになる。ここで、土石流発生の下限が図－3のように93年7月を境に急変していることを参照して、限界値として、93年6月までは時間雨量7mm、93年7月以降は時間雨量15mmとしている。図－10に比べると両期間を通じてまとまった関係がえられる。これより直線回帰式を求めると

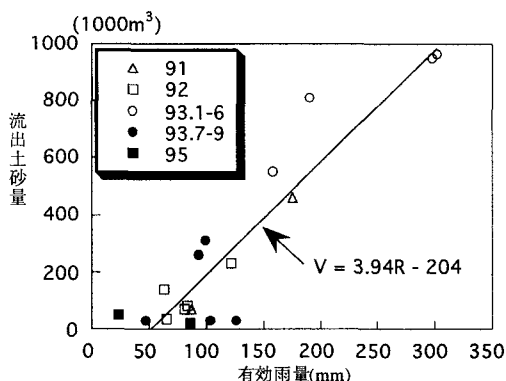
$$V = 3.94R - 204 \quad (1)$$

となる。ここに、 V は流出土砂量（1000 m^3 ）、 R は有効雨量（mm）である。

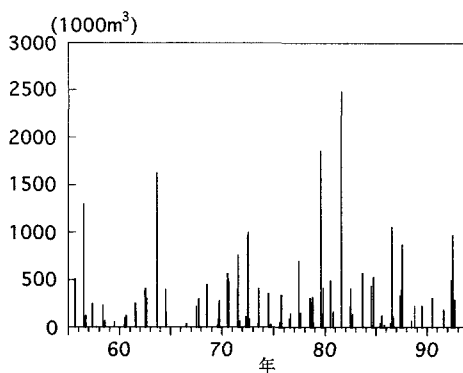
次に、雲仙測候所の時間雨量記録を用いて56-94年における流出土砂量を想定する。発生限界を15mmとして有効雨量を求め、それを（1）式に適用して95年7月までの流出土砂量を計算すると、最大流出量は181万 m^3 で、一回の流出土砂量が100万 m^3 を超えるのが40年間に4回起こることになる。これより月流出量を求めて示すと図－13がえられ、月流出の最大は255万 m^3 、また、年最大流出量は258万 m^3 となる。これらの値が水無川において当対象とすべき土砂量であると考えられる。



図－11 最大累加雨量図



図一 1 2 流出土砂量と有効雨量



図一 1 3 想定月流出土砂量

5. おわりに

雲仙・水無川の土石流の発生状況を調べた結果下記の結果が得られた。

(1) 土石流発生限界及び雨一流出量の関係は、93年6-7月を境に変化している。そしてこの変化は最近の火山活動の衰退に先行して起こっていると思われる。

(2) 土石流の計測結果から、土石流の流出量が集中度の高い強雨に規定されることが明らかになった。また、土石流の流出解析に、ニューラルネットワークが有効であることが示された。

(3) 過去40年間の降雨に対して土石流の流出量を推算した結果、当面の想定流出土砂量は260万m³程度で、それに対応できる砂防施設の建設が急務であると考えられる。

94年以降強雨がなく、大規模な土石流が発生していないので、流出土砂量と降雨の関係の検証は不十分である。95年3月以降、普賢岳の火山活動は停止したままであり、新たな火山灰の供給は生じていないが、強雨の際には依然として大規模な土石流の危険性が予想される。土石流と降雨の関係については、今後も詳細な検討を継続する必要がある。

最後に、貴重な資料を提供していただいた気象庁雲仙測候所及び福岡気象台の関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 平野宗夫・岩元賢・原田民司郎 (1976) : 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
- 2) 平野宗夫・森山聡之・岩元賢 (1992) : 土石流の発生限界降雨と発生予測、文部省科学研究費 (No. 03306010) 突発災害研究成果、1991年雲仙における土石流の調査研究No.B-3-1、9-14
- 3) 平野宗夫・森山聡之・川原恵一郎 (1993) : 雲仙・水無川における92年の土石流災害、文部省科学研究費 (No. 04302045) 総合(A)研究成果、雲仙における土石流・火砕流の調査研究、1-7
- 4) 平野宗夫・正田誠・森山聡之 (1986) : 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
- 5) 川原恵一郎・平野宗夫・森山聡之 (1995) : ニューラルネットワークによる土石流発生限界降雨の評価、水工学論文集、第40巻
- 6) 平野宗夫・橋本晴行・村上浩史 (1993) : 雲仙水無川における土石流の現地計測とその特性、水工学論文集、第37巻、705-710
- 7) 平野宗夫・原田民司郎 (1994) : 水無川における土石流の流出特性、文部省科学研究費 (No. 05302071) 総合(A)研究成果、雲仙岳の土石流・火砕流災害に関する調査研究、5-12
- 8) 森山聡之・平野宗夫・上松泰介・川原恵一郎・白川朋道 (1992) : 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巻、43-48
- 9) 川原恵一郎・平野宗夫・森山聡之 (1995) : ニューラルネットワークによる土石流流出量の予測、水工学論文集、第39巻、705-708