

振動センサーを用いた土石流の検知と流量予測

PREDICTION OF OCCURRENCE AND HYDROGRAPH OF VOLCANIC DEBRIS FLOWS BY MONITORING GROUND TREMOR

疋田 誠¹・橋本 晴行²・森山 聡之³・酒谷 幸彦⁴・会田 和義⁵

Makoto HIKIDA, Haruyuki HASHIMOTO, Toshiyuki MORIYAMA,
Yukihiko SAKATANI and Kazuyoshi AIDA

¹正会員 工博 鹿児島高専教授 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

²正会員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市箱崎6-10-1)

³正会員 工博 崇城大学助教授 環境建設工学科 (〒860-0082 熊本市池田4-22-1)

⁴農修 国土交通省大隅河川国道事務所 (〒893-1207 鹿児島県肝属郡高山町新富1013-1)

⁵(株) アイ・エム・ティー (〒899-5116 鹿児島県始良郡隼人町内熊元932-5)

We have observed debris flows by using a new system of ground tremor sensors in the Nojiri River of Mt. Sakurajima, volcano, Japan. The purpose of this study is to obtain a reliable predicting method of debris flow in volcanic area which has less vegetation and therefore yields abundant sediment. To examine the phenomenon of debris flow, we carried out outdoor experiments of ground tremor, and replicated the surging out of debris in an active volcano. The frequency of ground tremor is approximately from 10 to 200 Hz. We were successful in finding the optimum value of parameters to estimate the hydrograph of debris flow by using a computer program of neural network. Our trigger system of detecting the debris flow is applicable to the occurrence of landslide, snow avalanche and so on.

Key Words : active volcano, debris flow, disaster prevention, ground tremor, hydrograph, neural network

1. はじめに

雲仙普賢岳の噴火や、鹿児島県出水市の大規模な地滑りに伴う土石流災害は記憶に新しく、大きな社会問題になっている。本研究は、これら土石流の早期予知、規模の予測を行うために、振動センサーを利用した土石流予測システムの開発を行うことを目的としている。

さて、1957年以降、桜島は継続して火山活動を続けており、火口から噴出される火山灰は山頂付近に堆積し、降雨を引き金として、数多くの土石流が継続的に発生している。奥田等は、桜島の野尻川で、地震観測所の地震計データから、土石流による地盤振動の存在を指摘している¹⁾。平野・疋田等は、桜島の長谷川で、流域の到達時間に着目、ワイヤーセンサーによる土石流の発生と不発生を確認して、土石流の発生予測モデルを提案している²⁾。しかし、降雨情報のみによる住民の避難警報の発令は、時間的余裕・信頼性の点で問題が残る。諏訪等は、焼岳東斜面の上々堀沢で、振動センサーを用いた

土石流による地盤振動の計測を行っている。その結果、ピーク流量と地盤振動に強い相関性があることを指摘した³⁾。

国土交通省大隅河川国道事務所では、1994年12月と1996年11月に、土石流の通過する野尻川下流に振動センサーを3個設置している⁴⁾。本研究では、堤内地に設置された振動センサーを用いた現地土石流の確実な検知方法の開発をすすめた。実用性が高く、土石流の通過に伴う地盤振動の物理現象の解明を試みるために、土石流が流路工を通過する際に発生する地盤振動の屋外シミュレート実験結果をおこなった。しかる後、桜島の土石流の観測結果を比較し、考察を行った。更に、土石流のハイドログラフの予測について検討した。

2. 土石流のシミュレーション実験

(1) シミュレーション実験装置

写真-1は、鹿児島高専の屋外において、土石流が



写真-1 河床（供試体+玉砂利）

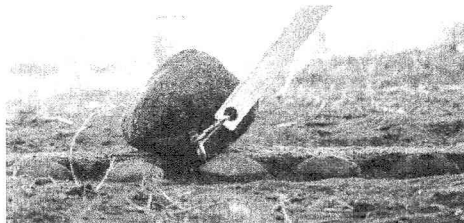


写真-2 溶岩の移動の様子

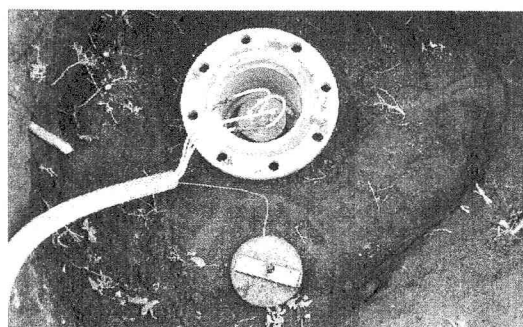


写真-3 振動センサー（埋設時）

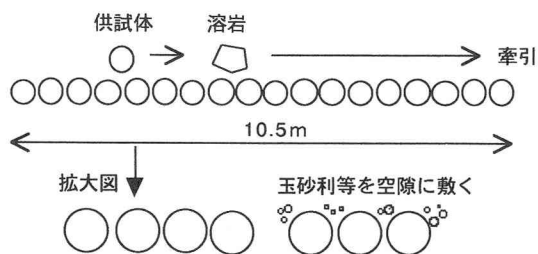


図-1 シミュレーション実験の模式図

通過する流路工の河床モデルを示したものである。野尻川に見られる流路工の凹凸の影響を考えた河床のモデルとして、直径12.5cmの円柱状のコンクリート供試体を半分、土中に埋設し、水平に敷き並べた。供試体の間は、平均径1cmの玉砂利を埋設した。水平に均一に平坦化された河床の区間長は10.5mである。土石流は、通常、溶岩・火山灰・雨水が混在している。ここでは、河床に強い衝撃力を与える溶岩に着目、写真-2に示すように、桜島から採取してきた溶岩（直径約13cm、幅約22cm）を用い、駆動装置を用いて転がすことにした。写真-3に示すように、センサーは流路工の中間地点の地表下0.5mに埋設した。いずれも、振動加速度を測定するセンサーで、3軸方向に計測可能な高感度のセンサー（上側：TEAC製710Z）と、鉛直に1軸方向で周波数帯域の広い安価なセンサー（下側：TEAC製

708LF）を計2個、設置し、比較検討した。図-1は、模型実験装置の模式図である。敷き並べたコンクリート供試体との間には、玉砂利・土・火山灰砂の3種類を敷き詰めた。土石流に相当する走行荷重は、コンクリート供試体と溶岩の2種類である。図-2に、シミュレーション実験の条件を示す。牽引する流下物体の条件を〔 〕で、河床条件を右側に示している。座標軸は、水平に下流方向をX軸、X軸に対して水平直角にY軸、鉛直下向きにZ軸である。

(2) 実験結果と考察

コンクリート供試体は、円筒の中心軸で回転させ、溶岩は引きずる状態で牽引している。図-2の(a)は、河床の供試体の間に玉砂利等を置かず、供試体を速度0.4m/sで走行させた場合である。一定時間間隔で、強い衝撃力が発生している。図-2の(b)は、溶岩を走行させた場合で、実際の野尻川の土石流の地盤振動の波形と比較的よく類似する。そこで、間隙に、図-2の(c)は玉砂利、(d)は表層土、(e)は野尻川の流路工で採取した火山灰砂を、河床の供試体の間隙に詰め、それぞれの波形を示した。図から、(c)玉砂利、(e)火山灰砂、(d)表層土の順に、振動の波形の大きさが小さくなっていることが分かる。

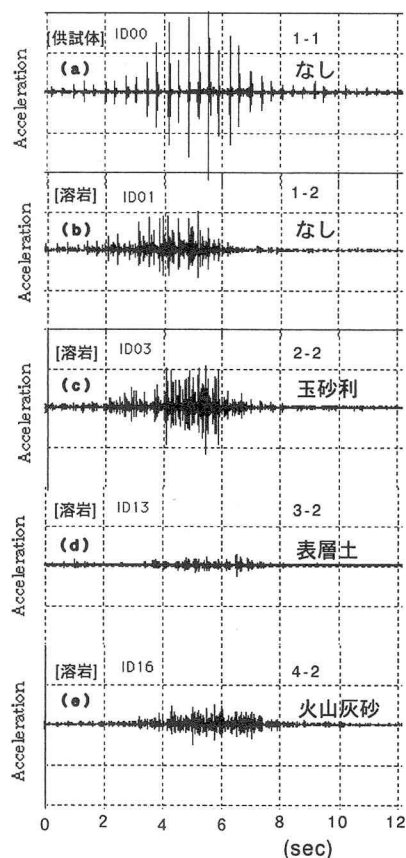


図-2 走行加重による地盤振動（TEAC-710Z）

図-3は、桜島野尻川の土石流（Z軸方向）による地盤振動の波形の例である。図-4は、図-3のピーク流量

付近の約0.5秒間と、火山灰砂を空隙に詰めた状態、
図-2(e)の波形を比較したものである。野尻川では流
路工の高水敷の地下約1mに、センサーを埋設したも
のであるが、振動はかなり大きくなっている。図-5は、
両者の地盤振動のスペクトルを示したもので、10～5
00Hz位で推移している。2種類の振動センサーを用
いた測定を行った結果、地盤の振動波形を見た限りでは、
安価なZ軸のみの1軸方向のセンサーで十分使用可能な
ことが判明した。

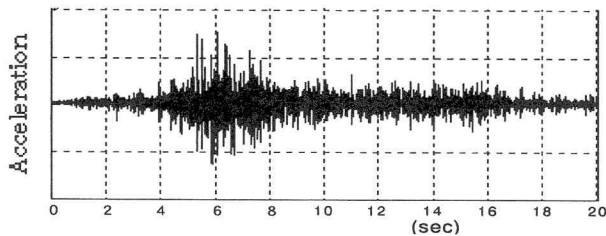


図-3 野尻川の土石流の波形 (1995. 5. 1, TEAG-710Z)

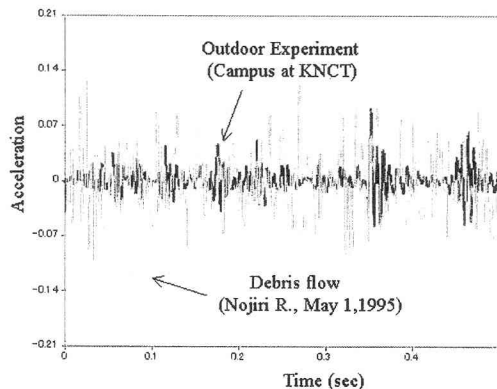


図-4 野尻川の土石流と地盤振動実験のデータの比較

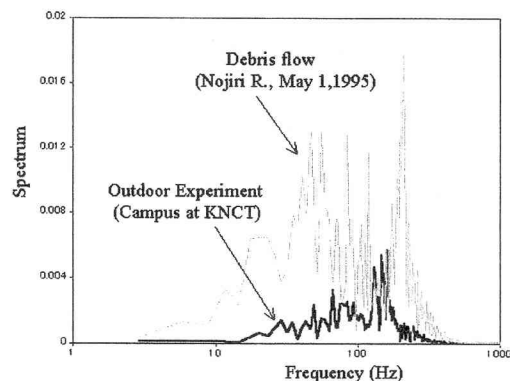


図-5 スペクトル解析結果の比較

2. 野尻川の土石流による地盤振動

(1) 振動センサーの設置と地盤振動のデータ

写真-4は、野尻川の流路工において、振動センサー
の埋設状況である。センサーは一辺1mの空間の下部に、
周囲を地盤と直結するように、置かれている。

図-6は桜島における野尻川の流域図である。図-7は

野尻川下流の流路工におけるセンサーの設置の状況 (横
断面図) である。下流方向をX軸、X軸に対して水平直角
にY軸、鉛直上向きにZ軸をとっている。センサー1
(S1)とセンサー2(S2)は流路工右岸のコンクリ
ートで被覆された高水敷に埋設している(X=0m及び100
m)。センサー1とセンサー3(S3)はY方向に3.4
m、18.1mの位置にある。

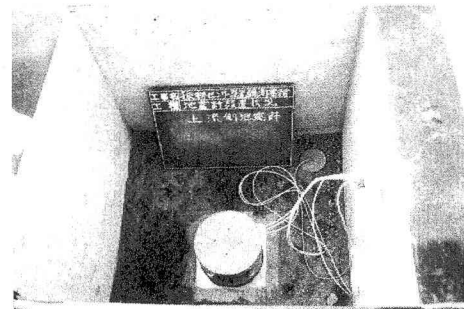


写真-4 野尻川の振動センサー (埋設時)

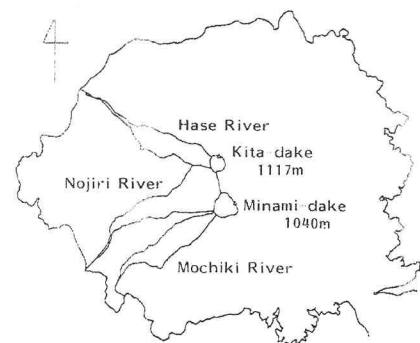


図-6 野尻川の流域図

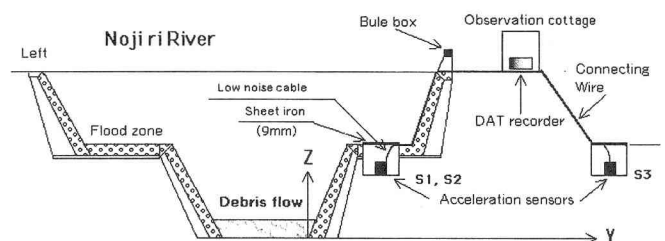


図-7 野尻川の振動センサーの設置状況

1997年に、本センサーにより検知された対象デー
タは2つあり、手動計測の3月29日及び自動的に3回
検知の9月16日のものである。土石流の振動解析には
流量等の計測されている9月16日の振動データを用い
た。

図-8は、1997年9月16日の土石流の地盤振動
の波形(X軸)である。合計7個(A～G)に識別され、
各々、10分間連続したデータである。センサー1と2
は流下方向に100m離れており、波形の大きさの変化
から下流のセンサー2ではピークの遅れが明瞭に識別で
きる。センサー3は、センサー1より約15m離れ、堤

内地にある。センサー3の計測の最大値を2Vに制限していたため、最大値はカットされているが、土石流の地盤振動は低水路から離れてもよく伝わっている様子が理解できる。一方、ワイヤーセンサーで検知された土石流は、図のC～G (○) の時間帯において、超音波を用いた流量データ (水位及び流速を計測) を得ている。これから、振動加速度センサーを用いると、ワイヤーセンサーの場合よりも、さらに小規模の土石流、図のA, B (×) も検知できることが判明した。

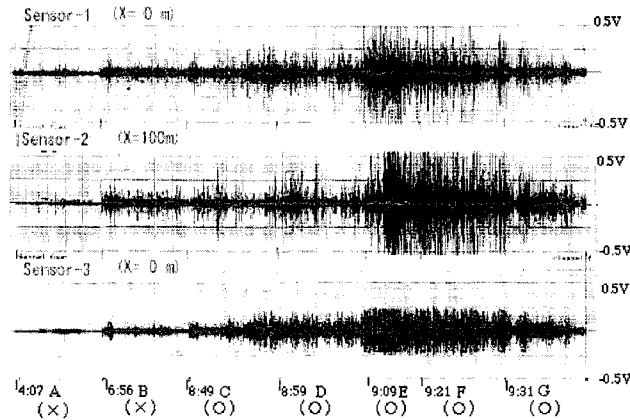


図-8 地盤振動の時間的推移 (1997.9.16)

(2) 土石流による地盤振動と水理特性

土石流の振動解析には、流量等が観測されている1997年9月16日のデータを用いた。図-9は、設置された3つのセンサーによる地盤振動レベルS (gal=cm/s²) の時間的推移を示したものである。流量Q、センサー1とセンサー3の振動レベルS1, S3及び水深Hの時間的推移をプロットしている。途中に一部データの欠測があるが、土石流の増減傾向を一望できる。ピーク流量は9時12分に227m³/sであった。

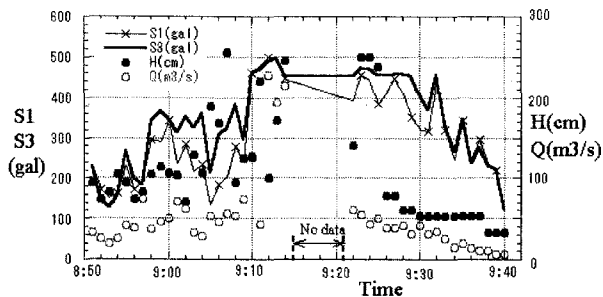


図-9 流量Q, 水深H, 振動レベルS1, S3の時間的推移

振動レベルは、デジタルレコーダ (DAT) で記録されたデータを再度、AD変換し、30秒単位 (30000個) で計測した。数値データは大きいものから、1/3最大、1/10最大の2種類の値を求めたところ、1/10最大は、1/3最大の約1.5倍となった。図-10は、1/10最大の値に対して、3つの振動センサーの関係を示したものである。

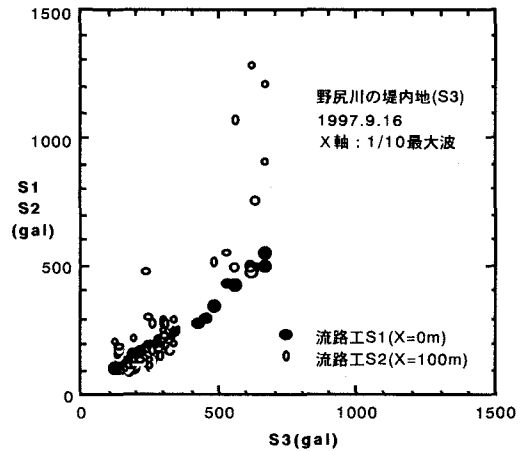


図-10 3つの振動センサーの関係

図-11は、振動レベルと流量の比S/Qを、水深Hに対してプロットしたものである。ピークに達する増加部でのS/Qの値は、ばらつきはあるが、水深H=70cm以上ではほぼ一定である。減衰部の値は、水深70cm以下である。水深が小さくなるに従って、S/Qの値は次第に大きくなっていることが分かる。水深が小さくなると、河床の凹凸の影響が大きくなるために、振動レベルが、より大きな値を示す傾向にある。

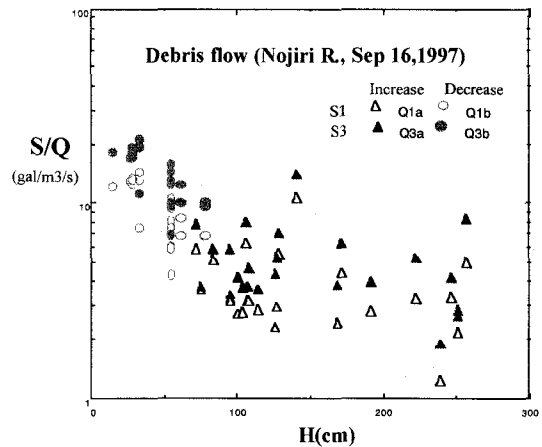


図-11 地盤振動/流量と水深の関係

(3) 土石流のハイドログラフの推定

卓越するパワースペクトルの振動レベルSと観測流量Qの関係式として、 $S=20 \cdot \log Q - \text{const}$ とおける。しかし、土石流の増加部と減衰部を比較した場合、振動レベルは前者の方が高い。定数(const)の物理的意味を吟味する必要がある。図-11で、 $S/Q=5$ と置き、振動レベルから計算流量を求めた値を、プロットすると、ピーク直前までの増加部で、実測流量と比較的よく一致する。しかし、ピーク付近では、観測流量のばらつきが大きく、減衰部では観測流量の約2倍程度の計算値となった。その結果を、図-12に示す。

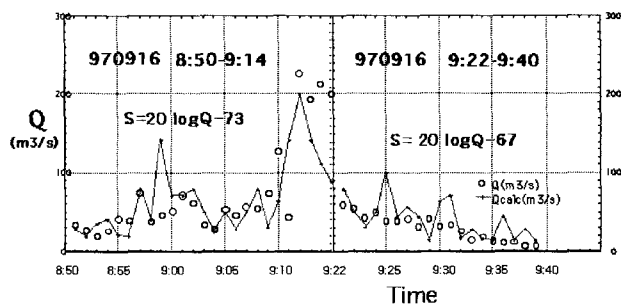


図-12 流量の計算結果と観測値の比較
(S/Q =一定)

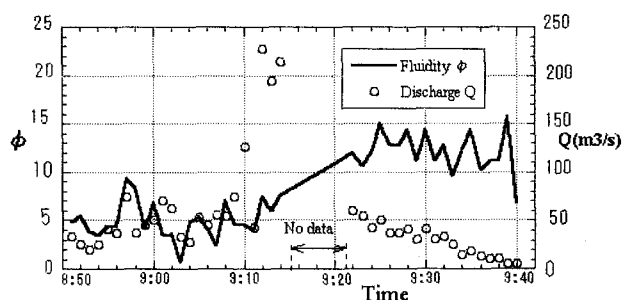


図-13 流速係数 ϕ の時間的推移

増加部と減衰部の違いは、その流動性と考えられる。図-13に、流速係数 $\phi = V/U_*$ (V : 平均流速, $U_* = \sqrt{g R \sin \theta}$: 摩擦速度, g : 重力加速度, R : 径深, $\theta = 4.2^\circ$: 河床勾配) の時間的変化を示す。これから、ピークを過ぎると、流動性が顕著になることが理解できる。

次に、ニューラルネットワークを用いて、地盤振動のデータから土石流のハイドログラフの推定を試みた。学習させる際の入力データとして、振動データ S_1 , S_3 、水深 H 、流速係数 ϕ 、および時間 t を組み合わせた。教師付き学習法であるバックプロパゲーション(誤差逆伝播法)を利用し、教師となるデータとして、観測流量 Q を用いた。

ニューラルネットワークでは、各層の値を0から1で与えるので、各データをそれぞれの最大値で除し、入力データとした。

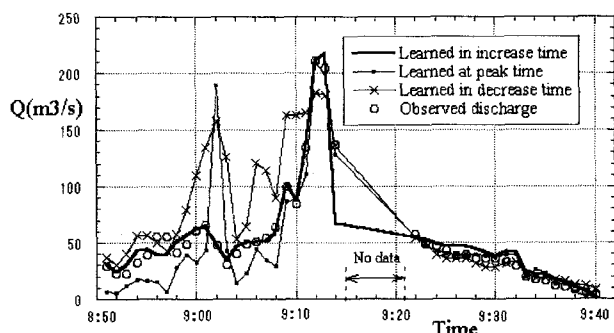


図-14 ニューラルネットワークによる
流量の計算結果と観測値の比較 (S_1 , S_3 , H を入力)

データは、増加部、ピーク部および減衰部の3つの時間帯で学習させた。データのばらつきを少なくするために移動平均させた所、図-14のように、増加部で学習させた結果が最もよい相関を示した。この1997年9月17日の例では、得られた重みを使用すると、センサー1と3の振動レベルは $S_1 \leq 500\text{gal}$, $S_3 \leq 496\text{gal}$ 、水深は $H \leq 256\text{cm}$ の領域で、流量推定が可能であった。

水深 H の代わりに、流速係数 ϕ を用いた場合も、ハイドログラフの推算を試みた。その結果、 ϕ の値を、増加部とピーク部で最大値の0.3倍、減衰部で0.8を用いると、図-15のようになる。減衰部を除けば、計算流量は実測流量と概ね一致する。減衰部では補正を必要とし、図-13に示されるように土石流の流動性が異なるためと考えられる。

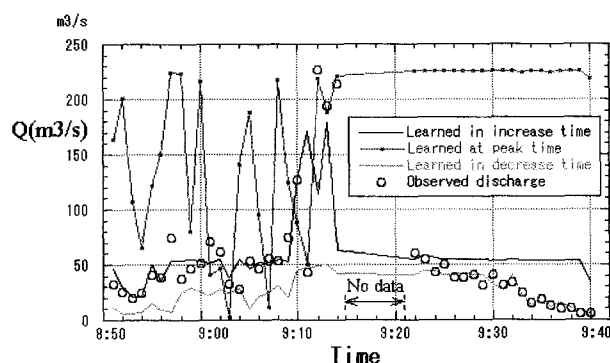


図-15 ニューラルネットワークによる
流量の計算結果と観測値の比較 (S_3 , ϕ を入力)

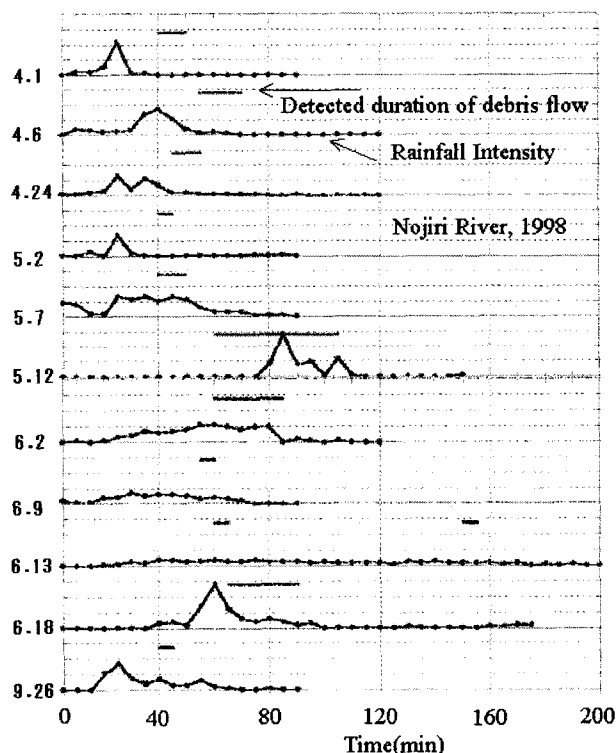


図-16 5分間雨量と振動センサーによる
土石流の検知の時間的推移

(4) 振動センサーによる土石流発生の検知

野尻川に設置した振動センサーによる土石流の検知の可否を確認した結果を、図-16に示す。鹿児島市内の鹿児島地方気象台の5分間雨量（折れ線、縦軸1mm単位）に対して、土石流検知が作動した時間帯（横線）を示している。鹿児島市内と桜島の野尻川は約5kmの距離にあり、降雨分布の多少の相違も考えられるが、同図から、振動センサーによる土石流発生の検出は十分機能していることが分かる。

3. まとめ

本研究においては、土石流センサーの検証を桜島で実施し、土石流発生場の溪谷に設置可能な機器の開発を行った。我国で大規模な土石流が頻発する桜島の野尻川下流の流路工で現地観測を、鹿児島高専で必要な屋外の土石流実験を実施した。

野尻川の土石流は、水位・流速を超音波方式で観測、これを検証に用いた。土石流の通過に伴う地盤振動を捉えるために、堤防の高水敷および堤内地の地表下に、振動加速度センサーを計3箇所に取り込み、DATテープにて記録収集、研究室で解析をすすめた。桜島は活火山で噴火危険地域にあるため、火山性地震による誤作動が多かった。対策として、土石流による地盤振動成分のみ検出する技術開発が必要となった。屋外シミュレーション実験の結果、振動センサーは安価な一軸のものでも十分であることが分かった。

次に、土石流による地盤振動レベルSの時系列変化から、土石流の流量Qを推定する方法を検討した。まず、S/Qの比は土石流の増加部と逓減部では傾向が異なるが、各々一定とみなすことにより、地盤振動から流量を推定することが可能となる。次に、ニューラルネットワークモデルを用いたハイドログラフ予測法を検討した。教師付き学習法であるバックプロパゲーションを利用し、入力データとして、堤内地の地盤振動レベルS3と流速係数 ϕ を用いた所、流速係数 ϕ に対して、増加部とピーク部で最大値の0.3倍、逓減部で0.8の値を用い、増減部で学習させると、計算流量は実測流量と良い一致が

みられた。流量予測値の精度を向上するためには、土石流の増加部と逓減部の流動特性の違いを考慮したモデルを考える必要がある。今後の検討課題である。

更に、土石流通過時の地盤振動による土石流の検知および流量計測を行う手法が示された。周波数特性を考慮した検知トリガー回路を新たに設計開発することにより、確実な土石流の検知に成功した。野尻川での検証の結果、土石流の発生だけでなく、流量についても、観測事例を増やすことにより、十分、予測可能と考えられる。

本研究で開発された手法は、雪崩、長大斜面の地滑り等への応用も十分可能と考えられる。早期予知のためには、出来る限り、土石流センサーを上流の土石流発生場に設置することが望まれる。このために、無線によるデータ転送の手法を取り入れ、実用的な土石流センサーの開発をすすめたいと考えている。

謝辞：本研究をすすめるに際して、国土交通省大隅河川国道事務所、(財)砂防地すべり技術センターより、多くのご協力を頂きました。本論文の作成にあたり、筑波大学の宮本邦明教授、摂南大学の澤井健二教授より、貴重なご助言を頂いた。鹿児島高専の榎並利征技官、卒業研究生には、現地観測や屋外実験に際して、終始ご協力を頂いた。ニューラルネットワークの数値計算では、前村武生氏（鹿児島市役所）に多大な労力を頂いた。ここに厚く謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 奥田節夫：桜島野尻川流域に発生した土石流と地震計記録の対応，昭和51年6月豪雨による鹿児島県の土砂および土石流災害に関する調査研究報告書，pp.121-124，1976.
- 2) 平野宗夫・疋田誠・森山聡之：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，水理講演会論文集，Vol.30，pp.181-186，1986.
- 3) 諏訪浩・山越隆雄・佐藤一幸：地盤計測による土石流の規模推定，砂防学会誌，Vol.52-2，pp.5-13，1999.
- 4) 山田孝・南哲行・水野秀明：土石流災害防止のためのセンサー開発の現状と今後の課題，砂防学会誌，Vol.50-5，pp.60-64，1998.

(2003.4.11受付)