

## ◆ 紹介 ◆

## 総合的な土石流検知手法の構築

山田 孝\* 南 哲行\*\* 水野秀明\*\*\*

### 1. はじめに

福島県西白川郡西郷村(平成10年8月、死者5名)、鹿児島県出水市針原川(平成9年7月、死者21名)、秋田県鹿角市八幡平(平成9年5月、温泉宿16棟全壊)、長野県姫川支川蒲原沢(平成8年12月、死者14名)等での災害事例にみられるように、依然として悲惨な土石流災害は跡を絶たない。そのような災害を防止するためには、砂防施設の整備に加え警戒避難体制の確立(災害直後に行方不明者の救出作業を行う際の二次災害防止を含む)が非常に重要となる。その手段の一つとして、センサーによって土石流の流下を確実に検知することが急務の技術的課題となっている。

従来の土石流検知システムでは、各種のセンサーのうちどれかが起動した場合(概ねワイヤーセンサーである場合が多い)を土石流の流下とみなすため、土石流の検知精度はそのセンサーの検知能力のみに依存する。そのセンサーが適切に起動しない場合は土石流の検知はできない。例えば、ワイヤーセンサーは一度切断されてしまうと新たに張り替えない限り、引き続いて流下する土石流を検知できない。落石や動物による誤作動もある。また、光センサーは、濃霧の状態では作動しない場合がある。振動センサーについては、土石流のタイプや地盤の地質条件によって振動の卓越周波数や伝播性、減衰性が大きく異なるため、どの程度のトリガーレベルを設定したらよいのか不明の点が多い。

今回、新たに検討している土石流検知システムでは各種のセンサーを総合的に組み合わせることによって各々の欠点を補完し、結果として様々なタイプの土石流や地形・地質条件でも確実に土石流検知を行うことができることを目的としている。

本論では、既往の土石流検知センサーの得失や簡易センサーの開発動向について概説し、総合的な土石流検知システム構築のための考え方を紹介する。尚、センサーによって得られた情報の伝達・通信手段については現在、電話回線や光ファイ

バーケーブル等を用いた有線方式、テレメータ等による無線方式がある。効果的な総合的な土石流検知システムを開発するためにはセンサーのみならず、これらの伝達・通信手段の改良や開発も重要なとなるが、本論ではセンサーのみについて言及する。

### 2. 土石流検知センサーが必要とされる事態

以下の4つの事態が想定される。

- ① 突発的な災害発生時において、行方不明者の救出作業を支援し二次災害を防止するために緊急に設置する場合
- ② 河道における天然ダムの形成、地震に伴う山腹斜面のクラック発生、火山噴火の兆候が認められたり、噴火後の降雨により土砂流出の恐れが生じた時に緊急に設置する場合
- ③ 通常ベースの砂防工事中の安全対策として設置する場合
- ④ 小規模な土石流危険渓流における人家保全のために設置する場合

いずれの事態についても、土石流を確実に検知すること、危険区域(直接アクセスできない場所も含む)に設置する場合も有り得るので、後述する非接触型かつメンテナンスフリーのセンサーを検知システムの中核的存在として組み入れること、さまざまなセンサーの組み合わせによってシステム全体としての誤作動防止、検知の確実化を図ること、が求められる。

### 3. 従来の土石流検知センサーの概要と問題点

これまで主に用いられてきた主な土石流検知センサーとしてはワイヤーセンサー、光センサー、超音波式センサー、振動センサーがあげられる。土石流がセンサーに接触することによってセンサーが起動するタイプが「接触型センサー」であり、ワイヤーセンサーが該当する。また、土石流がセンサーに直接接触しないでもセンサーが起動するタイプが「非接触型センサー」であり、光センサー、振動センサー、超音波式センサーが該当する。建設省の調査(平成9年7月)によると、日本全国に

おける土石流検知センサーの設置箇所は 88 箇所であり、その内訳は、ワイヤーセンサーが 68 箇所、光センサー、超音波センサーが各々、4 箇所、3 箇所、振動センサーが 11 箇所、その他(音響センサー)が 2 箇所である。

#### (1) ワイヤーセンサー(図-1)

渓流内を横断方向にある高さ(0.6~1.0m程度)で電線を張り、土石流がそれを切斷することによって検知される。雷等によるノイズの影響を受けないため、センサーとしての信頼性は高い。コストも低く、各種センサーの中では最も全国的に普及している。しかしながら、一度ワイヤーが切斷されれば連続して発生する土石流を検知できない。再度現地に赴いてワイヤーを張り直さない限り、その後に連続して発生する土石流を検知することはできない。また、その設置にあたっては現地での手作業となるために人間がアクセスできない場所には設置できない(例えば深い谷)。さらに、動物や雪風、落石等の外的な要因による誤作動の可能性がある。

#### (2) 光センサー(図-1)

砂防ダム袖小口等に設置したセンサーから赤外線ビームを河道の横断方向に発射し、土石流によってそれが遮断されることによって検知する。豪雨や霧、降灰等による誤作動が多い。

#### (3) 超音波式センサー(図-1)

河道上部から土石流の流れの表面に向けて超音波を鉛直方向に射出し、土石流の流動深を測定する。また、土石流に向けて斜め方向に超音波を射出し、流速を計測する。

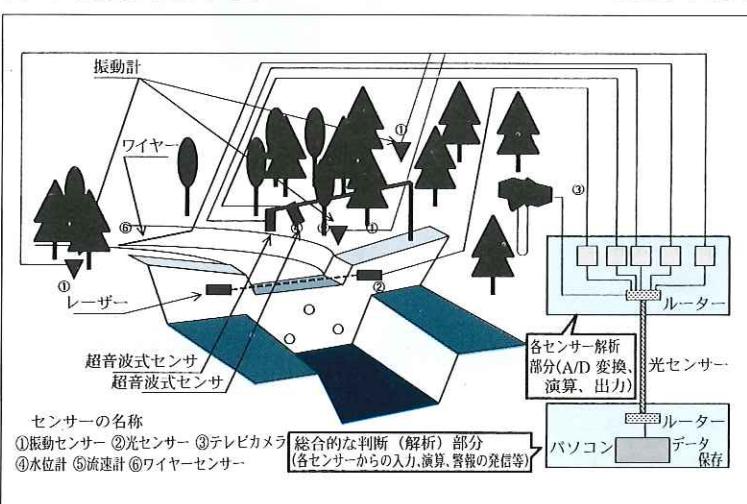


図-1 総合的な土石流検知システム

土石流に含まれる巨礫によって流れの表面形の変動が著しい場合は、データの精度が低下する。

#### (4) 振動センサー(図-1)

土石流の流下に伴って発生する地盤振動を地中に埋設したセンサー(圧電型加速度センサーや弾性波探査用ピックアップ等)で検知する。連続して発生する土石流の流下を検知できる、メンテナンスが少ない等のメリットがある。雲仙普賢岳水無川に設置された振動センサーから得られた地盤振動のパワースペクトラムを解析した結果、土石流の卓越周波数は、数 Hz から 10 数 Hz のあたりに分布し 10 数 Hz 以上の振動成分をある程度含んでいることが明らかにされている<sup>1)</sup>。ビナツボ火山での現地観測によれば、洪水の流下に伴う地盤振動の周波数は 100Hz~300Hz の間にピークを持つのに対し、泥流状の土石流のそれは 10Hz~100Hz のより低周波の範囲にピークを持つことが報告されている<sup>2)</sup>。このような周波数域の違いは、流域内の地形や地盤構成材料、振動発生源(土石流)からの距離、センサーの固有振動数等の違いによるものと考えられる。

土石流の流下を確実に検知するためには、振動センサーのトリガーレベルを的確に設定する必要がある。トリガーレベルを小さくしすぎると、下流にとって無害な小規模の土砂流でも検知してしまい、空振り率が大きくなる。反対にトリガーレベルを大きめに設定すると見逃しの危険がある。

#### 4. 全国公募による土石流検知センサーの開発

以上、列記した各種センサーには構造が複雑であり、価格も高く、維持管理に労力を要するため、現場での実用化が困難であるという問題点が指摘されているものもある。そのようなことから、(財)砂防フロンティア整備推進機構では、土石流危険渓流における警戒避難や砂防工事の現場における安全対策等に活用すべく、①連続する土石流の検知が可能であること、②管理、維持が容易なこと、③設置する場合渓流内に入れない場合も想定する、といった条件を満たす「土石流検知システム」についての技術的

なアイディアを砂防関係業務に携わる全国の個人から募集した。その結果、64 システムの応募があり、その中から、次の 3 つが優秀アイディアとして選ばれている。即ち、①渓流に射出されたロープ状の検知部の先端につけられた小型バケット等に土砂が入り、それが流水圧で下流に引っ張られることによって検知を連続的に検知できる「連続発射式土石流検知システム」、②渓流上に棒状のフリコのセンサーを吊るし、土石流のフロントがセンサー先端を跳ね上げ、角度が生じることにより検知を行う「ハネルセンサー」、③土石流から発信される自然放射能を受信することによって検知を行う「土石流遠隔感知システム」、である。このうち、「ハネルセンサー」(図-3)については構造が簡単で実用性が高いため、この 6 月に現地での試作品の設置に向けて、地建と土木研究所との共同で実用化が急がれている。

## 5. 総合的な土石流検知システムの満たすべき要件

各種センサーには固有の問題があるため、現時点では 1 種類のセンサーのみで土石流検知を確実に行なうことは非常に困難である。各種センサーの検知精度を高めるとともに、様々な種類のセンサーを総合的に組み合わせることによってシステム全体としての検知精度を向上させることが重要となる。以下に、総合的な土石流検知システム(図-1)構築のための考え方を示す。

- ① ワイヤーセンサー、光センサー、超音波式センサー(水位計、流速計)、振動センサー、ビデオカメラの組み合わせを原則とする。なお、これらのセンサーの設置箇所は、各々の現場において想定される土石流の流速、下流保全対象までの流下時間、地形等を考慮して決める。
- ② 土石流の第一波を検知するためにワイヤーセンサーを設置する。但し、ワイヤーセンサーは前述の様に動物や落石等による誤作動の危険があるので上下流 2 箇所を 1 セットで設置し、これら 2 箇所が起動し、かつ上流側が下流側よりも先に起動した場合に、「ワイヤーセンサー起動」という信号が伝送されるプログラムとする。
- ③ ワイヤーセンサー切断後、ワイヤーセンサーを再度張り替えるまでの間に発生する土石流は、光センサー、超音波式センサー、振動センサーにより対処する。

④ 光センサーは検知すべき最低の流動深の位置に設置する。光が遮断された場合、「光センサー起動」という信号が伝送されるプログラムとする。

⑤ 超音波式センサー(水位計)には予め検知すべき最低流動深の値を入力しておく。この値がある一定時間観測された場合(巨礫による誤差防止のため)、「超音波式センサー起動」という信号が伝送されるプログラムとする。

⑥ 振動センサーは土石流以外の振動(例えば、落石や車両によるもの)による誤作動を防止するためには右岸(土石流や流水による侵食の影響が及ばない箇所)に各々 2 基設置する。右岸、左岸ではいずれも上流、下流の 2ヶ所に 1 基設置する(図-2)。両岸のセンサーが同時に起動すること、右岸、左岸ともに上流側のセンサーが下流側のセンサーよりも先に起動することにより、「振動センサー起動」という信号が伝送されるプログラムとする。なお、振動センサーは上流のワイヤーセンサーやその他の

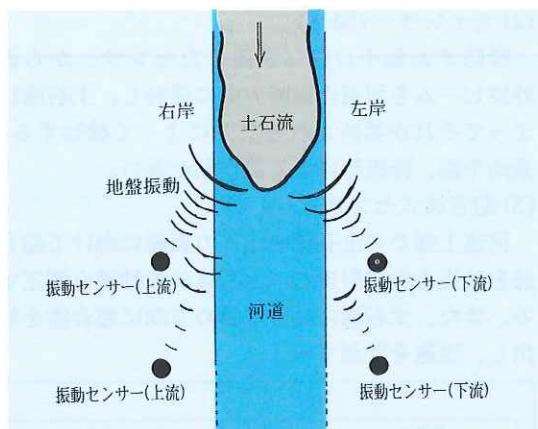


図-2 誤作動防止のための振動センサー設置方法

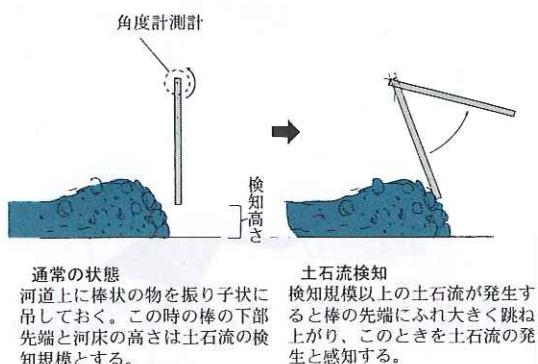


図-3 「ハネルセンサー」による土石流検知方法

センサーの作動によっても起動するようとする。  
 ⑦ 検知システムの誤作動防止を計るため、ワイヤーセンサー、光センサー、超音波式センサー、振動センサーのうち、2種類以上の起動信号が伝送された時を、原則として「土石流が流下している状態」とみなす。

⑧ 超音波式センサー(水位計、流速計)から、土石流流量をオンラインで把握できるよう、計算プログラムをシステム内に組み込む。

⑨ 土石流の流下状況を夜間や濃霧時でも映像で把握出来るよう、原則として赤外線カメラを活用する。カメラは省電力化を図るためにワイヤーセンサー、その他のセンサーと連動して起動するようなプログラムとする。

## 6. 総合的な土石流検知システム構築にむけた研究課題

当研究室では前述の考え方に基づき、以下の課題について現在、モデル渓流にて鋭意研究を進めている。

### ① 振動センサーのトリガーレベルの設定手法

土石流の規模と地盤振動の卓越周波数域、振幅速度(加速度)との関係を、土石流ハイドログラフにおける流量増加期、ピーク流量時、流量減衰期の各時期において明らかにする必要がある。それらの成果をもとに、検知を確実に行うことができるトリガーレベルの設定手法を作成する必要がある。

### ② 振動センサーの設置範囲の設定手法

センサー設置のためのアクセスが困難であるため河床付近からかなり遠くの所にセンサー部を埋設しなければならないような状況下でも対応できるよう、振動源からの距離(垂直距離、水平距離)に伴う地盤振動の減衰機構を明らかにする必要がある。その結果を基に地盤振動に

よる検知可能範囲の設定手法を作成する必要がある。また、前述したように減衰しにくい地盤条件での複数の振動センサーを用いた検知手法についても明らかにする必要がある。

ちなみに、これまでの筆者らの桜島野尻川での観測結果によると、河床から70m程度内であれば地盤振動による検知が可能であること、土石流による地盤振動の振幅速度はおおむね、振動源(土石流)からの距離の逆数に比例して減衰しており、半無限均質弾性体における振動の減衰式が適用できること、内部減衰は0.01~0.02程度の値をとること、などが明らかにされている。  
 ③ 各種センサーの組み合わせによる検知システム全体としての誤作動防止手法と土石流検知精度の向上のためのセンサー組み合わせ手法

## 7. おわりに

各種センサーの組み合わせによって土石流検知の確実化を図るために総合的な土石流検知システムの考え方等について概説した。当研究室では全国の土石流頻発渓流からいくつかのモデル渓流を選定し、「総合的な土石流検知システム」を構築するための集中的な土石流観測を行っている。その成果を基に、全国の土石流危険渓流への普及を図ることができるよう、本年度中に「総合的な土石流検知システム」の構築手法を提案する予定である。

## 参考文献

- 諏訪浩、清水洋：雲仙に発生した土石流と火碎流による地盤振動の特性、文部省科学研究費(No.03306010)突発災害調査研究成果 重点領域研究「自然災害」総合研究班、1991年雲仙における土石流の調査研究研究成果報告書、pp.40-51、1992。
- Marcia,S., Melosantos,A., Hadley,K., LaHusen,G., and Marso,J., : Instrumental Lahar Monitoring at Mount Pinatubo, FIRE and MUD,Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines, University of Washington Press, pp.1015-1022,1996.

山田 孝\*



建設省土木研究所砂防部  
砂防研究室主任研究員、農博  
Dr.Takashi YAMADA

南 哲行\*\*



同 砂防研究室長  
Noriyuki MINAMI

水野秀明\*\*\*



同 砂防研究室研究員  
Hideaki MIZUNO