共同研究報告書

整 理 番 号 第 ４ ４ ５ 号

振動検知式土石流センサーを活用した土石流監視手法に関する共同研究報告書

平成２４年 10 月

独立行政法人土木研究所
日 本 工 営 株 式 会 社
株 式 会 社 拓 和
坂 田 電 機 株 式 会 社

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共 同 研 究 報 告 書
第 445 号　2012 年 10 月

振動検知式土石流センサーを活用した土石流監視手法に関する共同研究報告書

土木研究所火山・土石流チーム
上席研究員　石塚　忠範
主任研究員　山越　隆雄
研　究　員　武澤　永純

日本工営株式会社
中央研究所 総合技術開発部　小原　大輔
株式会社　拓和
システム技術部　課長代理　柳町　年輝
坂田電機株式会社
計測工事部 計測技術課　樋口　佳意

要　旨：

本報告書は、土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームと民間企業 3 社が、平成 20 年度から平成 22 年度にかけて実施した「振動検知式土石流センサーを活用した土石流監視手法に関する共同研究」について、その成果をとりまとめたものである。

本共同研究では、現場のニーズに対応できる振動センサーの開発・改良を目的として、振動センサーの開発および振動波形の利活用方法の検討を行った。

キーワード：土石流、振動検知式土石流センサー、土石流監視、検知基準

担当者一覧

独立行政法人土木研究所

土砂管理研究グループ　火山・土石流チーム上席研究員　石塚 忠範

土砂管理研究グループ　火山・土石流チーム上席研究員　田村 圭司※1

土砂管理研究グループ　火山・土石流チーム主任研究員　山越 隆雄

土砂管理研究グループ　火山・土石流チーム研究員　武澤 永純

日本工営株式会社

中央研究所　総合技術開発部　地盤耐震グループ課長　大角 恒雄※2

中央研究所　副所長　高橋 秀

流域・防災事業部　河川砂防部 課長　長山 孝彦

中央研究所 総合技術開発部 地盤耐震グループ研究員　小原 大輔

株式会社　拓和

システム技術部　部長代理　能和 幸範

システム技術部　課長代理　柳町 年輝

新技術開発センター　開発課　主任　岡田 和幸

新技術開発センター　設計課　主任　谷山 佳史

坂田電機株式会社

計測工事部 計測技術課長　樋口 佳意

計測工事部 計測技術課　係長　才田 誠

計測工事部 計測技術課　永江 祐

※１　現国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所

※２　現徳島大学

目　次

１．概　要　・・・1
　１．１　背景　・・・1
　１．２　振動検知式土石流センサーに関する基本的な事項　・・・2
　１．３　本共同研究で開発したセンサーについて　・・・7
　１．４　本報告書の内容と位置づけ　・・・8
２．振動センサーの開発、改良　・・・9
　２．１　土石流検知特化型の振動センサーの開発　・・・9
　２．２　現場汎用型振動センサーの開発　・・・24
　２．３　無線運用型振動センサーの開発　・・・41
３．振動センサーによる土砂流出規模推定について　・・・61
　３．１　桜島における土石流の振動と流量の関係　・・・61
　３．２　振動波形から土石流の移動速度を推定する手法について　・・・71
　３．３　まとめ　・・・76
４．振動センサーを活用した土石流監視手法について　・・・77
　４．１　土石流検知センサーの設置目的　・・・77
　４．２　共同研究で開発した振動センサーを活用方法　・・・79
　４．３　まとめ　・・・81

謝辞
参考文献

１．概　要

１．１　背景

土石流の発生を検知し、警戒避難体制や砂防工事の現場の安全確保のために「土石流検知センサー」が用いられている。これは土石流が発生した場合、その発生を出来るだけ早く的確に把握することを目的として設置されるものである。

現在一般的に用いられている土石流検知センサーはワイヤーセンサーである。これは渓流にワイヤーを張り、土石流がワイヤーを切ることによって警報を発するもので、１度ワイヤーが切断されれば、再度現地に赴いてワイヤーを張り直さない限り、次に発生する土石流を検知できないという問題がある。これは土石流に限らず、風雨、降雪や落石、動物等によって切断された場合も同様である。

一方、土石流には石礫が数多く含まれており、それらが秒速数 m～十数 m の速度で流下するため、土石流は周辺地盤に大きな振動を与える。そこで、土石流に含まれる岩、礫等が地盤に衝突する際に発する地盤振動から、土石流の発生を検知する振動検知式土石流センサー（以下、振動センサー）が開発され、現在実用化されている。しかし、現場へ広く普及させるためには、以下の課題が考えられる。

A）価格が高いこと

B）土石流の発生を判定する閾値の設定が困難であること

よって、当研究チームでは、A）、B)を満足し、かつ現場のニーズに対応できる振動センサーの開発・改良を目的として、平成 20 年度から平成 22 年度まで日本工営株式会社、株式会社拓和、坂田電機株式会社 3 社と共同研究を実施した。

１．２　振動検知式土石流センサーの基礎的な事項

振動センサーは地盤を介して伝搬する土石流の振動から土石流の発生を判定するセンサーであることから、一般的に使われているワイヤーセンサーと比べて、土石流検知のメカニズムが複雑である。そこで、ここでは振動センサーに関する基礎的な事項を簡単にとりまとめる。

１．２．１　土石流検知センサーとは[1)]

土石流災害を防止・軽減するためのセンサーは、その目的から、「土石流予知センサー」と「土石流検知センサー」とに大別される。「予知」とは、対象とする事象が発生する前にそれが生起する時間、規模、場所の少なくともひとつを予測するものである。一方、これに対して「検知」とは、対象とする事象が発生した場合、その状況を出来るだけ早く的確に把握することである。

土石流検知センサーは、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（接触型センサー）と、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（非接触型センサー）の２つに区分され、土石流の流下に伴って発する地盤振動を検知する振動センサーは、後者に属する。

１．２．２　どのようなメカニズムで土石流は振動を発するのか[2)]

土石流が発生して谷を流れ下ってくると、雷鳴の轟き、あるいはジェット戦闘機が至近距離に飛来するような轟音が響き渡り、土石流の先頭部がそばを通過するときには、地盤が強く振動すると言われている。これは土石流の先頭部には多量の巨石が含まれていて、流動中にこれらが互いに衝突する、あるいは渓床や渓岸に衝突することに起因すると考えられている。

１．２．３　土石流の振動とはどのような特徴があるのか

土石流に伴う地盤振動は、土石流が頻発する渓流において観測が実施され、振動の強度、継続時間、周波数特性などの分析が行われている。

（1）振動の振幅

土石流の振動加速度は、土石流に含まれる礫の大きさと土石流の流速に依存することが考えられる。これは、土石流のサージが含まれる最大礫が流路床に衝突するときに生じる衝撃力は、礫の最大粒径と土石流の流速に影響するからである[2)]。焼岳の観測事例では、土石流のピーク流量とそのときの振動加速度値には正の相関があることが明らかになっている[2)]。

既往の調査・観測事例により、土石流の振動計測事例はいくつか報告されているが、振動振幅は震源から発する振動の強さや観測機器と土石流との距離、媒質（地盤）の特性等によって大きく影響を受けるため、事例毎の比較は困難である。参考までに、富士山大沢川では、100gal を越える振幅値が計測されている[4)]。また、速度型センサーでの観測結果であるが、桜島で観測された土石流は、渓流から 29m 離れた位置に設置されたセンサーで最大 0.08cm/sec を計測している[3)]。

（2）振動数

土石流の特性が振動特性に与える影響は明らかになっていない。これは、振動特性が土石流の性質のみならず、媒質や土石流と観測機器との距離等に影響すること等により、詳細な分析・検証が困難であることが考えられる。

一方、既往の調査・観測事例によると、土石流の流動形態により、振動特性に違いが見られることが指摘されている。例えば、奥田らは焼岳上々堀沢で渓流から 15m離れた振動ピックアップで観測された土石流の振動波形を分析した結果、先頭部は 10-30Hz、先頭部が通過してからは 60-80Hz が卓越していることを述べている[5]。また、大角らは、桜島野尻川で渓流から 15m離れたボアホールタイプサーボ型振動計の記録から、土石流発生前の小規模な泥水のときは 150Hz を越える高い周波数領域の振動が確認でき、土石流流下時には高振動数が消滅し、10-30Hz の低振動数側に卓越振動数がシフトすることを指摘している[7]。さらに、ピナツボでの事例では、水流による地盤振動の強度は 100Hz より高周波数帯に集中するのに対し、土石流や土砂流による振動はこれより低周波数帯に集中することが報告されている[8]。これらの結果から、土石流の先頭部が発する振動は、土石流よりも土砂濃度が低い流れの形態よりも低い振動数領域を示すことが推察される。言い換えれば、土石流よりも土砂濃度が低い流れの形態を対象に振動センサーを活用する場合は、例えばセンサーの応答周波数が高帯域側にあるものを用いる等の配慮が必要と考えられる。

また、土石流の振動を地震や火山観測の目的で設置された地震計によって観測された事例がいくつか報告されているが、それらについては前述の結果よりも低い振動数帯域である。例えば、加茂らは、渓流から 0.5km から 1km 離れた地震計で観測された土石流の振動を分析したところ、8Hz より高い周波数帯域で、土石流振動と火山性微動に明瞭な違いが見られることを指摘している[3]。諏訪らは、雲仙普賢岳において、速度型地震計で観測された土石流と火砕流の振動を分析したところ、震源から 1km 離れた地震計において、土石流の卓越振動数は 5～14Hz に見られた[4]。また、森脇は蒲原沢で発生した土石流について、現地から 5.7km 離れた地震観測点で得られた波形を分析した結果、卓越振動数は 1-2Hz の帯域が最も顕著であったことを指摘している。

これらについては、地震計と土石流の距離が km オーダーで離れているため、土石流の振動のうち、距離減衰を受けやすい高振動数帯域が消滅したことが原因と考えられる。

（3）継続時間

土石流振動の継続時間は、1 波毎に継続時間が数分と長く、中には 40 分以上にわたって続いた事例が報告されている[4]。一方で、土石流の流量と地盤振動の関係については調和的であること[6]が報告されていることから、土石流の流下が続く間は、振動が継続するものと考えられる。

（4）桜島での振動観測事例

ここでは、実際に観測された土石流のハイドログラフと振動波形から、その特徴を具体的に示す。

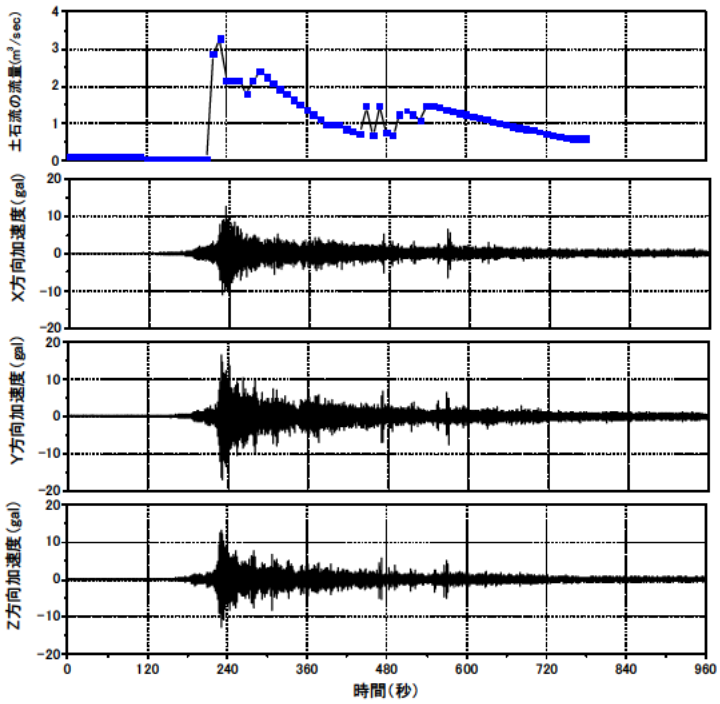


図-1-2-1　土石流の振動波形（上から、土石流のハイドログラフ、水平方向の加速度波形（X）、水平方向の加速度波形（Y）、鉛直方向の加速度波形（Z））

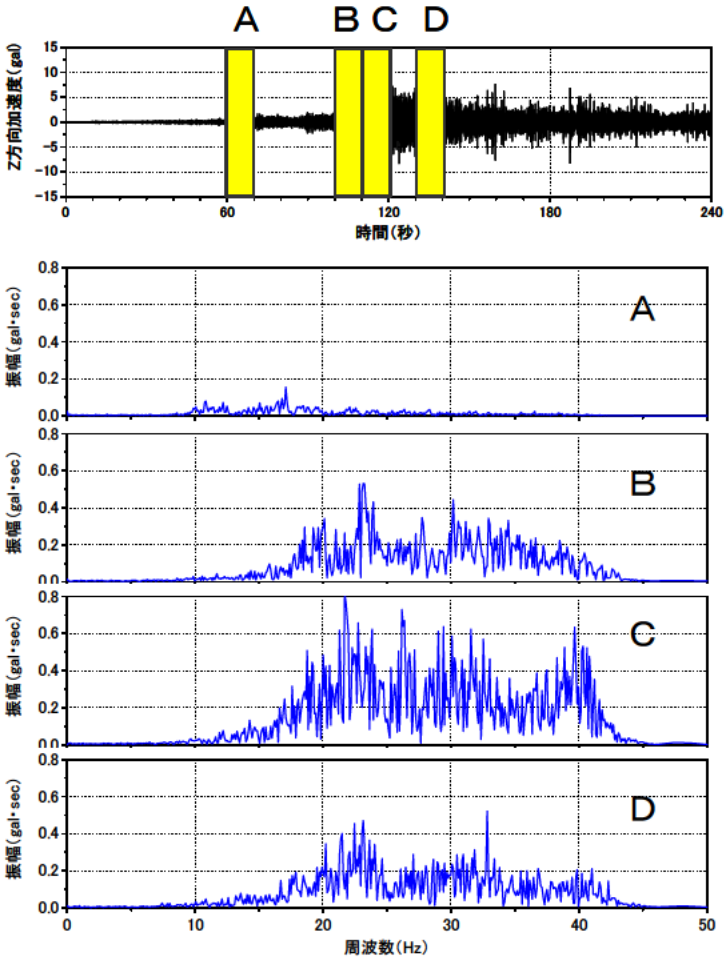


図-1-2-2　土石流の振動波形のフーリエスペクトル（記号はフーリエスペクトルを計算した区間）

図-1-2-1 は鹿児島県桜島野尻川で平成 19 年 2 月に発生した土石流のハイドログラフと振動センサーの波形である。振動センサーは土石流の流心から 30m程度離れた位置に設置されている。振動センサーの応答周波数はDC～40Hz である。図より、以下のことが推察できる。

○土石流の流下中、振動波形は継続している。

○土石流のピーク流量が大きい箇所（240 秒付近）で、振動波形も大きくなる。土石流のピーク流量が漸減している箇所では振動波形の振幅も小さくなる。

○土石流のピーク流量は急激に増加するが、振動波形は土石流の到達前より徐々に増幅する。

○水平、鉛直方向の振動波形の形状は概ね同じである。

また、図-1-2-2 に図-1-2-1 の鉛直方向の振動波形（120-360 秒のデータ）およびフーリエスペクトルを示す。アルファベットA～D は、その区間の 10 秒間のデータ（サンプリング周波数は 100Hz）を切り出して、スペクトルを計算した結果である。振動波形のうち、図のAは土石流到達前でかつ常時ノイズより大きな振動が観測された時期、Bは土石流がセンサー付近を通過する直前、Cは土石流がセンサー付近を通過した直後、Dは土石流が通過した後とそれぞれ推察される部分である。図より、以下のことが推察できる。

○Aより、スペクトルの振幅は小さい。また、スペクトルはおおよそ 10-20Hz で分布していることがわかり、17Hz でスペクトルのピークが確認できる。

○Bより、スペクトルおおよそ 18-42Hz の広範囲で分布していることがわかり、スペクトルのピークは 24Hz で確認できる。Aと比べて、スペクトルの振幅が大きくなり、スペクトルの範囲が高周波数領域側に拡大した。

○Cより、スペクトルはおおよそ 17-42Hz の広範囲で分布していることがわかり、スペクトルのピークは 24Hz で確認できる。B と比べて、さらに振幅が大きくなり、40Hz あたりの振幅値が大きくなった。

○Dより、スペクトルはおおよそ 17-42Hz の広範囲で分布していることがわかり、スペクトルのピークは 24Hz で確認できるが、Cと比べて、スペクトルの振幅が全体的に小さくなり、40Hz あたりの振幅値の減衰が特に顕著である。

１．２．４　振動から土石流の発生をどのように判定するのか？

土石流検知センサーは、土石流を確実に検知することができ、かつ土石流以外の事象（ノイズ）を確実に棄却できる性能が求められる。既往の研究によると、振動センサーの場合、土石流の振動とそれ以外の事象の振動の特徴を利用した検知基準が提案されている。

（1）振幅

土石流は時には数mの岩塊を伴って流下するため、それらが地盤に衝突する際には大きな振動を発することが予想される。よって、振動波形の振幅値の大小から閾値を設定している場合が多い。平成 15 年時の実態では、震度 3 弱相当の振動強度や、センサー近傍で人がジャンプして検知できる程度、という基準で設定されている事例が目立つことが報告されている[8)]。

（2）振動数

振動数とは単位時間当たりに繰り返される波の回数のことである。既往の観測事例では、小規模な出水と有感地震、火山性地震、工事中のノイズ、電気的ノイズの振動数特性がそれぞれ異なることが明らかになっており[10]、それから土石流の発生・被発生を分離できる可能性が指摘されている。

（3）継続時間

１．２．３より、土石流の継続時間は長いもので40分程度続いた事例が報告されており、継続時間に着目することで、他のノイズを棄却できると考えられる。三重県西之貝戸川での検討事例によれば、閾値とする継続時間の秒数を大きくすればするほど誤検知が発生しなくなることが報告されている[11]。

（4）振動波形形状

土石流の振動は、土石流がセンサー直近を通過する前からセンサー設置地点に伝播することが明らかになっている[2]。土石流がセンサーに接近する前に振動が急激に増幅する傾向が確認されており、この現象をとらえることで土石流の警戒システムに適用できる可能性が指摘されている[12]。

また、地震学や火山工学で広く使われているエンベロープ比を用いた識別手法により、土石流と地震、ノイズを識別することが可能であることが報告されている[13]。

１．３　本共同研究で開発したセンサーについて

本共同研究で開発したセンサーの主な特徴を表-1-3-1 に-示す。開発したセンサーの仕様等詳細は 2 章に示す。

表-1-3-1　本共同研究で開発したセンサーについて

項目	土石流検知特化型	現場汎用型	無線運用型
検知手法	波形の形状or継続時間	振幅値＋継続時間	振幅値
検知信号レベル	１段階の警報値	5段階の警報値	１段階の警報値
波形記録	記録装置をつければ可	記録装置をつければ可	波形は記録できない
振動波形記録の回収方法	遠隔地から ダウンロード可能	現地で回収	波形は記録できない
センサーと受信機間の信号送信方法	無線	有線	無線
電源	ソーラーパネル＋バッテリー（波形記録の場合、商用電源が必要）	ソーラーパネル＋バッテリー	電池（受信機側は商用電源が必要）

１．４　本報告書の内容と位置づけ

本報告では、開発した振動センサーの諸元や最終成果についてとりまとめたものである。本報告書の構成は以下の通りである。

2 章では本共同研究で開発した各振動センサーの詳細な仕様を示す。3 章では土石流の振動観測事例を用いて、振動センサーによる土砂流出規模を推定する手法について紹介した。4 章では本共同研究で開発した振動センサーを用いた土石流監視手法の考え方を提案した。

２．振動センサーの開発、改良

２．１　土石流検知特化型の振動センサーの開発

２．１．１　概要

（1）　開発の目的

土石流による被害を防止・軽減するために、土石流の発生を迅速に把握し、避難活動に資する体制を構築することが重要であり、そのためにセンサー等を活用することは、有効な手法のひとつと考えられている。土石流検知センサーのひとつである振動センサーは、非接触にて土石流検知が出来、連続的に発生検知可能な有効なセンサーのひとつである。

しかしながら、その検知には、予め閾値を設定する必要があり、単純な振動振幅のみの閾値では誤検知する恐れもあることから、得られた振動波形に何らかの演算処理を加える必要があることがセンサー運用上の課題のひとつとなっている。そこで、検知精度を向上させた振動センサーを開発することとした。

（2）センサー開発の基本方針

センサー開発にあたり、現状の課題とその解決策を表-2-1-1 のとおりにまとめ、センサー開発の基本方針とした。

表-2-1-1　センサー開発の課題と解決策

課題	解決策
単純な振動振幅のみの閾値では、誤検知する恐れがある。また、複雑な土石流検知アルゴリズムを採用する場合、システムを構築する必要性があるなど、緊急性が損なわれる恐れがある。	誤検知が少ないアルゴリズムを採用する。また、センサー単独での検知が可能なセンサーとする。
遠隔地へ情報伝達を想定した場合、有線型であるとケーブル敷設工事の手間がかかり、設置に時間を要する恐れがある。	情報伝達に無線を使用したセンサーとする。
山岳地に設置する場合、商用電源が得られない場合がある。	太陽電池パネル等の自家発電設備にても運用可能なセンサーとし、比較的低消費電力なセンサーとする。

上表を満たすセンサーとして、リアルタイム演算処理による土石流検知アルゴリズムを実装した振動センサーの研究開発を行った。

２．１．２　センサーの基本性能に関する検討

（1）検知アルゴリズムの検討

土石流の検知アルゴリズムとしては、表-2-1-2 に掲げるアルゴリズムが考えられる。

表-2-1-2　提案されている主な土石流検知アルゴリズム

	エンベロープに基づく方法	振動振幅とその継続時間に基づく方法	波形の立ち上がりに基づく方法
概要	振動波形、高周波エンベロープと低周波エンベロープの比を算出し、その比が設定したしきい値を超えた場合、土石流発生とする。	振動振幅とその継続時間が、設定閾値を超えた場合、土石流発生とする。	波形の立ち上がり部分を指数関数で近似し、その相関係数が設定した閾値を超えた場合、土石流発生とする（後述）。
長所	エンベロープ比を用いることで、土石流、地震、ノイズの識別が可能とされる。	演算法が比較的簡便。継続時間を考慮することで、地震やノイズとの識別が可能と考えられる。	演算法が比較的簡便。近似する区間長により、地震やノイズとの識別が可能と考えられる。
短所	演算が高度であり、閾値設定には、事前検討やキャリブレーションが必要である。	閾値設定には、事前検討やキャリブレーションが必要である。	閾値設定には、事前検討やキャリブレーションが必要である。

エンベロープに基づく方法[8)] については、得られた振動波形に、リアルタイムでフィルタリング処理を行い、高周波成分のエンベロープと低周波成分のエンベロープを計算し、さらにその比（高周波エンベロープを分子、低周波エンベロープを分母とした場合の比で、エンベロープ比と呼ばれる）を求めるものである。その比が予め設定した閾値を超えた場合、土石流発生とするもので、既存事例では、土砂移動現象は平均して 10 程度以上、地震については、平均 0.7 程度、最大でも 1.5 程度、ノイズは平均 7 程度であったとされており、それらの比を用いることにより、土砂移動現象や地震、ノイズの識別が可能とされている。しかしながら、設置地盤の特性や渓流とセンサーの位置関係から、高周波や低周波の減衰傾向が異なることが予想されることから、比の値については、事前検討や現地運用しながらのキャリブレーションが必要になることが予想される。また、当該手法は、エンベロープ計算を実施することから、リアルタイムフィルタリング処理技術など高度な数値計算技術が必要となる。したがって、センサーとは別に、演算処理用 PC を必要とするような比較的大規模なシステムへの実装が向いていると判断した。

一方、振動振幅とその継続時間に基づく方法は、振動振幅とその継続時間が閾値を超えた場合、土石流発生とするものである。当該手法は、既存の振動センサーでも適用されている。簡便であるが、振動振幅と継続時間は、土石流の形態、センサーの設置地盤状況や流心からの距離によって変化することが予想されるため、閾値を事前に検討しておくか、現地運用しながら試行錯誤的に閾値を変化させていく必要がある。

波形の立ち上がりに基づく方法は、波形の立ち上がり部分を指数関数で近似し、その相関係数が設定した閾値を超えた場合、土石流発生とするものであり、本共同研究で開発した。その概念図を図-2-1-1 に示す。

当該手法は振幅によらず、適用できることから、汎用性が高いと判断した。

本節でのセンサーは、センサー単独で検知可能なものを目指すことから、波形の立ち上がりに基づく方法を主眼におき、開発を進めるものとした。

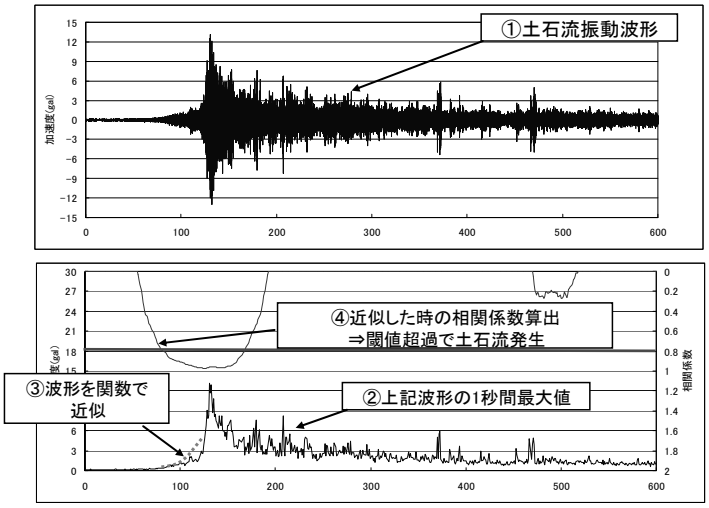


図-2-1-1　波形立ち上がりに基づく土石流検知アルゴリズムの概念図

（2）使用する無線通信の検討

無線に関しては、その通信技術の進歩から身近な生活に利用されるようになっており、携帯電話や PHS などのほか、家庭用家電、PC ネットワーク、非接触 IC カード等で広く利用されている。本節では、振動センサーに適用する無線通信手段について検討した。

現在、申請が要らず利用可能な無線のうち、近距離無線通信技術を検討対象とし、携帯電話回線や PHS 回線は、通信利用料が発生し、ランニングコスト上不利なため、ここでは検討対象外とした。また、近接無線通信技術である RFID（いわゆる IC タグ）は、種類にもよるが通信距離が数m程度であるため、検討対象外とした。ここで、比較検討とした無線通信技術を表-2-1-3 に示す。

特定小電力無線においては、トランシーバー等身近な分野で利用されているほか、砂防分野では、斜面崩壊検知センサ[14]や無人化施工機械での利用がある。当該通信のメリットは、伝送距離が数百m以上と比較的長いことと乾電池で運用できるような低消費電力であることである。ただし、本無線では、同一の無線周波数帯が近接する場合、電波干渉や混信が生じ、情報が伝達されない恐れがある。土石流災害発生時に無人化施工機械が稼動する局面を想定した場合、それら機械との混信が生じる恐れもあり、施工機械・センサーともに運用に支障をきたす恐れがある。そこで、本検討では、当該無線通信は利用に制約がある手段と判断した。

無線 LAN については、広く普及している無線通信技術であり、PC ネットワーク等で利用されている。近年では、街中等にも無線 LAN アクセスポイントが増え、ユビキタスネットワーク構築に向けて、技術普及がなされている。当該通信は対応機器が豊富でネットワーク化しやすい反面、同一周波数帯では電波干渉が生じる恐れがあることが短所である。今後、広く普及した場合、他の無線 LAN 機器との混信の恐れも否定

できないことから、当該無線通信についても、利用に制約がある手段と判断した。

Zigbee（ジグビー）については、家電向けの短距離無線通信規格の一つとして利用されている。当該無線の利点としては、小電力で低コストであるとともに、他システムからの干渉を回避する機能（近傍で使用中の無線周波数を避けて、最適な周波数を自律選択する機能）があり、ネットワーク構成にも柔軟に対応できることが挙げられる。一方、短所としては、一般的に伝送距離が 100m と短いことが挙げられる。しかしながら、近年では数百 m や km オーダーにも伝送距離が及ぶ機種も開発されつつあり、この短所が解消されつつある。したがって、本研究ではこの Zigbee を無線通信手段として利用するものとした。

表-2-1-3　使用する無線通信の評価一覧

名称	特定小電力無線	無線 LAN	Zigbee（ジグビー）
概要	免許を要しない無線局の一種で、小出力で小型のもの	無線通信を利用してデータの送受信を行う LAN システム	家電向けの短距離無線通信規格の一つ
使用する周波数	420～430MHz 帯、950MHz 帯　など	2.4GHz 帯、5GHz 帯など	2.4GHz 帯など
利用機器	トランシーバー　無人化施工機械など	パソコン　など	家電　など
長所	・伝送距離が比較的長い。 ・消費電力が低い。	対応機器が豊富で普及が進んでおり、ネットワーク化しやすい。 ・データ転送速度が高い。	・省電力で低コストである。 ・他システムからの干渉を回避する機能があり、ネットワーク構成も容易。
短所	・無人化施工で利用されている場合、混信の恐れがある。	・同一周波数の場合は、電波干渉が生じる。	・やや伝送距離が短い。 ・無線 LAN より、データ転送速度は低い。
近年の技術動向		・無線 LAN アクセスポイントが増えつつある。	・伝送距離は km オーダーの機器が開発されつつある。
センサ開発にあたる評価	△	△	○

２．１．３　開発したセンサーの性能

（1）概要

開発した無線型振動センサーは、土石流発生渓流近傍に設置し、土石流流下に伴う地盤振動を加速度波形として保存するものである。さらに、センサー内部の演算処理装置により、リアルタイムに加速度波形の演算処理を行い、土石流発生の有無を判定する。判定した結果を、無線を通して遠隔地へ自動的に伝達するこ

とができるものである。開発した振動センサーの外観、センサーのシステム構成を図-2-1-2、図-2-1-3 に示す。センサーの諸元を表-2-1-4 に示す。ここで、センサー内部の加速度計として、複数ある加速度計タイプのうち、どのタイプを使用するか検討を行った。実用化されている加速度計としては、①サーボタイプ、②MEMS タイプ、③ひずみゲージタイプ、④圧電タイプの 4 タイプがあり、各種メーカより、市販されている。概略の特徴は以下のとおりである。

①サーボタイプ：

サーボ機構とは、物体の位置、方位、姿勢などを制御量とした数値制御（NC：Numerical Control）で作動する機構のことであり、地震計でいえば加速度により振り子が 0 点よりズレようとする時、0 点位置を保持するよう、これを内蔵の微少変位検出器で測定しながら、コイルに電流を流すという機構を持ったタイプである。この 0 点に戻す電流（力）が加速度に比例することから、加速度を検出する。

②MEMS タイプ（半導体タイプ）

MEMS とは、Micro Electro Mechanical System の略で、半導体の微細加工技術を駆使して作製された微小な部品から構成される電気機械システムで、その技術を応用して製作される加速度センサである。タイプの違いにより、静電容量型とピエゾ抵抗型（半導体ひずみゲージ式）に分かれる。

③ひずみゲージタイプ

ひずみゲージとは、薄い絶縁体上に金属の抵抗体(金属箔)が取り付けられた構造をしており、変形による電気抵抗の変化を測定することによりひずみ量に換算するタイプである。

④圧電タイプ

圧電体に加えられた力を電圧に変換する、あるいは電圧を力に変換する、圧電効果を利用した素子を利用したタイプである。

評価項目は、信頼性（地震計としての使用実績）や耐候性（温度依存性など）等とした。加速度計の比較検討を表-2-1-5 に示す。使用実績、温度に対する耐候性等から、サーボタイプを選定した。また、測定成分については、前述の桜島での計測事例において、水平、鉛直方向の振動波形の振幅・形状は概ね同じであるとの指摘があり、センサー価格のコスト低減の観点から、鉛直 1 成分計測とした。測定分解能を高めるため、最大加速度を 200gal としている。得られた加速度波形については、内部のマイクロ SD カードにて保存される。

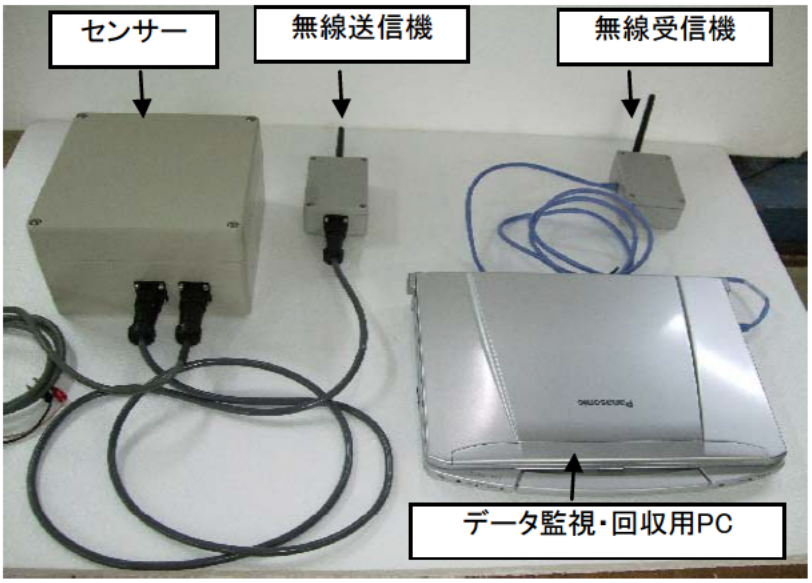


図-2-1-2　開発した無線型振動センサー外観

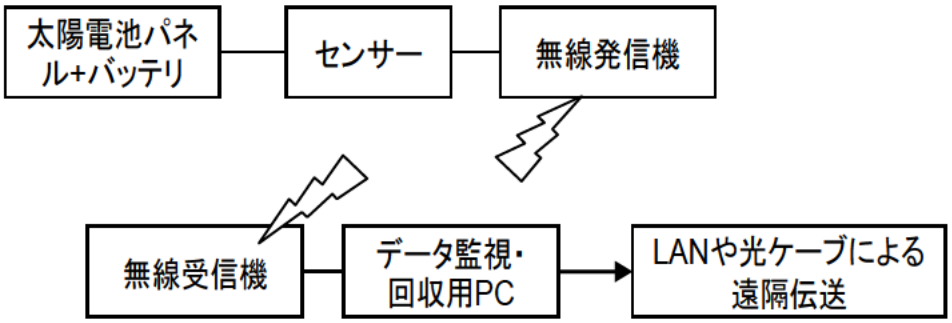


図-2-1-3　無線型振動センサーシステム構成図

表-2-1-4　開発した無線型振動センサーの主な仕様

内蔵センサー	サーボ型加速度計
観測方向	鉛直 1 成分
最大加速度	±200gal
サンプリング周波数	100Hz
無線通信規格等	Zigbee, 2.4GHz 帯
無線伝送距離	約 300m(使用環境による), 中継器を用いた延伸可
記録方式	トリガ計測方式（トリガ値任意設定可）
記録保存方式	マイクロ SD カード
電源	DC12V, AC100V も可
バックアップ電源	内蔵リチウムイオン電池にて 24 時間稼動可
消費電力	最大 3W 程度、待機時 1W 程度
筐体	アルミダイキャストボックス
保護等級	IP67
外形寸法、質量	200(W)×200(D)×120(H)mm、　約 4kg
特徴	・加速度波形から演算処理し、土石流発生を判定するアルゴリズムを実装した。アルゴリズムは波形立ち上がりを近似する方法、ならびに振動振幅とその継続時間に基づく方法である。 ・無線を介して、波形データの回収が可能。 ・受信機は LAN に直接的に接続可能。

センサー内部には、加速度波形を演算処理し、土石流発生を判定するアルゴリズムが組みこまれており、センサー単独での土石流検知が可能である。その仕組みとしては、土石流に伴う振動を検知すると、その波形をリアルタイム演算し、その結果が設定したある閾値を上回ると、無線を介して発生情報が PC に伝送するものである。具体な演算アルゴリズムを次節に記す。

土石流に伴う礫の飛散、ならびに火山地域での適用にあたっては、火山礫の降下も想定されるため、センサー筐体は、比較的強度の有するものとし、アルミダイキャスト製ボックスを採用している。

表-2-1-5　加速度計タイプの比較

加速度センサタイプ		概要・測定原理	測定周波数範囲	概略価格	メリット	デメリット	地震計としての実績	メーカ	評価
サーボタイプ		板バネに吊り下げられた振り子に、微少変位検出器と振り子を0点に戻すコイルからなる。加速度により振り子が0点よりズレようとする時、0点位置を保持するよう、これを内蔵の微少変位検出器で測定しながら、コイルに電流を流す。この0点に戻す電流（力）が加速度に比例する。	DC～100Hz程度	1成分10～20万程度	地震計として広く用いられている。高精度。高分解能。	電源が必要。その他加速度センサに比べ高価。	多数実績あり	㈱IMV ㈱東京測振 ㈱勝島製作所 等　多数	○ 地震計としての実績が多数あり、センサーとして信頼性は高い。
MEMS（Micro Electro Mechanical Systems：微小電気機械システム）タイプ 半導体加速度センサ	静電容量型	静電容量型は慣性質量(錘)をビームで支える構造で，変位は慣性質量と外枠の間の静電容量で変位を計測する.具体には、検出はビームに支えられている錘が傾くと、それに伴って可動電極も傾き、左右の静電容量が変化する。その容量差から加速度の大きさや方向を検出する。	DC～数100、1kHz程度 （製品により幅がある）	数千円～	質量が小さいため感度は低下するが劇的な小型化が可能。 安価。一般的にはピエゾ抵抗式より温度特性は安定しているとされる。（高い温度特性が要求される車載用途に適する）	温度ドリフトがあり、温度補償が必要。	多少あり （㈱数理設計研究所　PC接続型地震計）	国内メーカ（松下電工ほか）等　米国freescale社 米国Analog devices社　等	△ 安価な点が注目される。 ただし、温度の影響を受けるため、使用センサ選定にあたっては、メーカ技術資料の検討や事前の温度依存性確認(室内試験）などが必要。
	ピエゾ抵抗型（半導体ひずみゲージ式）	ピエゾ抵抗型は重りをビーム(バネ)で支える構造になっており，ビームに配置したピエゾ抵抗素子で変形を計測し，慣性質量の変位を求める。具体には、加速度が加わりマスが動くと、ビーム上のピエゾ抵抗が変化し、これを電圧変化して出力する。	DC～数100、1kHz程度 （製品により幅がある）	数千円～	質量が小さいため感度は低下するが劇的な小型化が可能。 安価。静電容量式に比べ、小型化が図りやすいとされる。（小型化が要求されるモバイル機器、家電機器などの用途に適する）	・温度ドリフトがあり、温度補償が必要。（近年では温度ドリフト補正可能なものも出始めた） ・静電容量式より温度に対して敏感とされる。	なし	国内メーカ（松下電工、沖電気、日立金属、富士通メディアデバイス）等	△ 安価な点が注目される。 ただし、温度の影響を受けるため、使用センサ選定にあたっては、メーカ技術資料の検討や事前の温度依存性確認(室内試験）などが必要。
ひずみゲージタイプ		力を受けると歪を発生するバネ材に、ひずみゲージが貼付されており、 このバネ材に重りとダンパーゴムが取り付けられている。 物体に加速度がかかると、歪みを生ずることから、その歪みを歪みゲージを利用して加速度を検出するセンサである。	DC～数KHz	1成分数万～10数万程度	電源が不要 構造が簡単、小型のセンサーが可能	加速度値 温度ドリフトの影響が比較的大きい。	なし （模型実験などに使われている）	国内メーカ(共和電業など）	× 比較的高価なこと、温度ドリフトの影響が懸念されるため、推奨できない。
圧電タイプ		圧電素子は慣性力Fを受けると電荷を生じる材料である。圧電型加速度センサの基本構造は、圧電素子を一定の質量mとベースで挟んだ構造になっている。加速度センサに与えられた加速度と圧電素子に加わる慣性力Fの関係は、ニュートン則で表される。加速度に対して発生電荷Qは一次比例するので、発生電荷より加速度が求められる。	数Hz～数10KHz程度	1成分 数万～10数万程度	電源が不要 構造が簡単、小型のセンサーが可能	・低周波側で特性が悪い。 ・感度・位相特性が均一でない。	なし （公害振動、振動レベル計などでは使われている。）	国内メーカ(リオンなど）	× 低周波での精度が悪く、橋の固有周波数とあわないため推奨できない。

（2）無線通信技術

センサーには、前節での検討の結果、Zigbee（ジグビー）と呼ばれる無線通信規格による無線送信機が接続され、およそ見通しで300m程度の伝送が可能である。さらに中継器を用いた伝送距離延伸も可能である。無線を利用することで、有線のようなケーブル敷設等工事を省くことができ、緊急的なセンサー設置に利することとなる。さらに、河床変動等により、センサー設置地に土砂堆積の恐れがある場合の移設作業も、有線に比べ簡便であり、機動性に優れる。

Zigbeeの特徴としては、無線中継器を用いた伝送距離延伸として、マルチホップ（多段のリレー）が可能であることである。これは、中継器が一つ故障したりして通信経路が途切れても，自律的かつ自動的に別の経路を設定する機能であり、この機能によりセンサーネットワークを構築できる点が挙げられる。センサーネットワークイメージを図-2-1-4に示す。

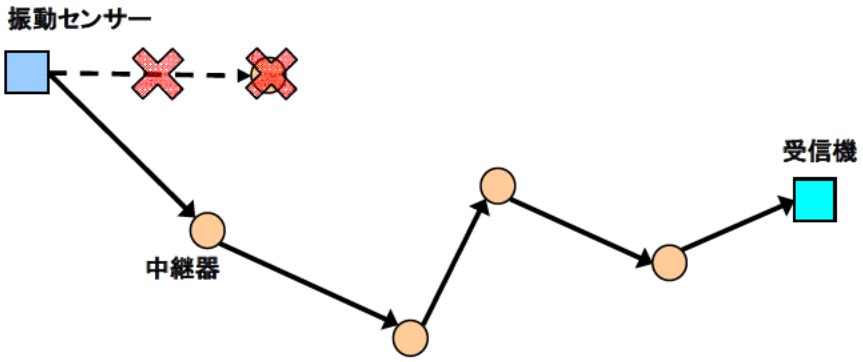


図-2-1-4　自律的なセンサーネットワークイメージ例

土石流の検知情報は、無線を介して自動的に受信機側に伝送される。さらに、この無線を介して、取得加速度波形のデータを回収することが出来、センサーに近づかなくとも、データ回収することが出来ることから、回収作業員が災害に巻き込まれることを防ぐことが出来る。

（3）電源供給

センサーへの供給電力については、商用電源での運用ができるほか、太陽電池パネル・鉛バッテリー等の自家発電設備での利用も可能である。

（4）検知アルゴリズム

前節で記述したとおり、振動センサーの検知精度を向上させるためには、土石流と認定する振動の閾値を、土石流の振動の特徴を踏まえたものにすることが有効であり、既往研究[2)]では、土石流の振動は土石流の到達前から徐々に増大することが確認されている。これは振動源となる土石流がセンサーに接近することに起因しているため、本研究では、振動波形の立ち上がり形状を指標とした閾値を開発した。

これは、振動波形の立ち上がり形状を指数関数で描かれる曲線にフィッティングさせ、その適合性（相関係数）を評価することで土石流の発生を判定しようとするものである。その概念図を図-2-1-5 に示す。具体には、土石流に伴う地盤振動波形をセンサーで記録し、その 1 秒間の最大値を求める。次に、その最大値の波形を指数関数で近似し、その相関係数を求める。相関係数が予め設定した閾値を超過した場合に土石流発生と判定するものである。判定は計測時点から前 80 秒間までのデータを利用して逐次演算する。近似する式を以下に示す。

$$Y = b \cdot \exp(at)$$

ここに、Y: 振動の立ち上がり形状、a,b : フィッティングによって得られる係数、t : 時間(秒)

センサーには、簡易的な検知アルゴリズムとして、以下のような振動振幅とその継続時間に着目したアルゴリズムも実装されている。これは、土石流に伴う振動データにおいて、設定した閾値以上の振動振幅が、設定した時間以上継続した場合、土石流が発生したと判定するものである。

①振動波形の鉛直方向波形を観測する。

②1 秒単位の振幅絶対値の最大値を求める。

③あらかじめ設定した振動閾値と継続時間閾値を超えた場合、土石流が発生したと判定する。

２．１．４　センサーの検証試験

（1）目的

開発したセンサーのアルゴリズムおよびデータ伝送等の動作確認を目的として、振動台にセンサーを据付け、土石流の観測振動波形や土石流検知の上でノイズとなり得る振動波形を入力波形として、センサーの室内試験を行った。

（2）試験方法

試験方法としては、土石流検知および誤検知要因となり得るノイズの棄却の検討を実施する目的で、以下の波形を振動台に入力し、振動台に据え付けたセンサーの動作確認を行った。

表-2-1-6　振動台実験に用いた入力波形一覧

対象	入力波形	備考
土石流の検知の検討	土石流の振動波形	桜島野尻川
ノイズ棄却の検討	人の歩行	桜島黒神川での振動実験による
	バックホウ走行波形	
	落石振動波形	
	地震波形	（独）防災科学技術研究所 KiK-net

入力した振動波形を図-2-1-5 に示す。

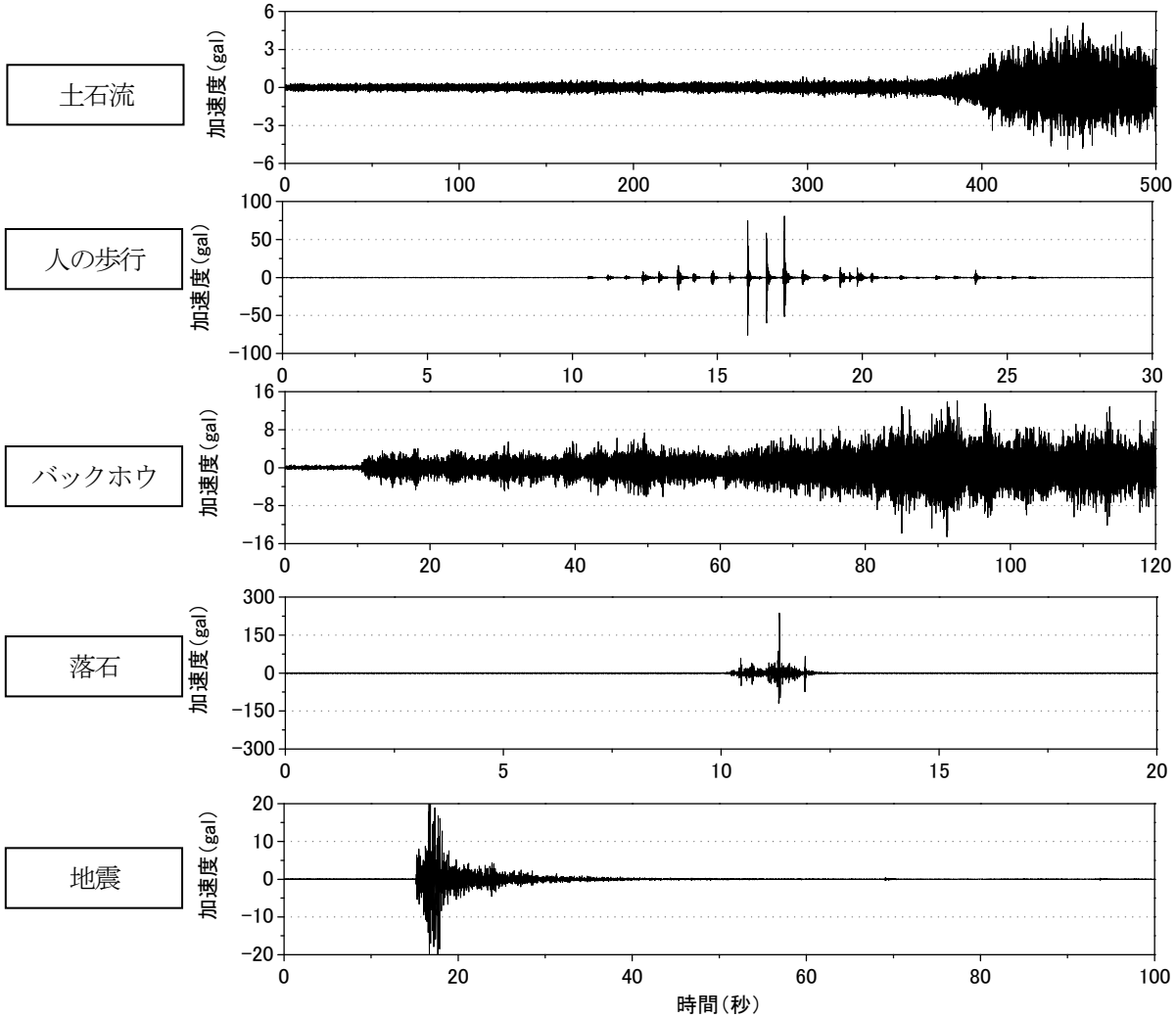


図-2-1-5　採用した解析振動波形

実験に使用した振動台は以下の仕様を有するものである。

型式　　：VS-3202H

最大加速度　　：50G まで

最大振幅　　：30mmp-p

加振周波数範囲　：0.1～50Hz

試験においては、振動台周辺（2m 程度の離隔）に無線受信モジュールと PC を置き、検知情報伝送も確認することとした。実験状況を図-2-1-6 に示す。

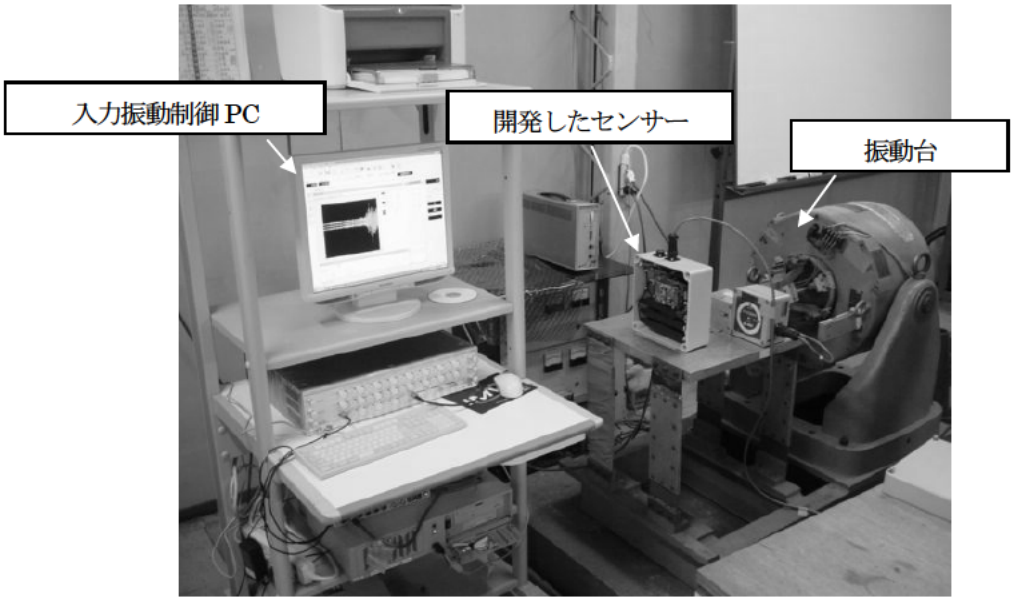


図-2-1-6　振動台実験の様子

（3）試験結果

1）土石流検知の検討

土石流に伴う振動波形の試験ケースとして、桜島野尻川で 2007 年 6 月 22 日発生した土石流に伴う振動の立ち上がり部分（図-2-1-5 に示す振動波形）を振動台に入力した。動作確認試験結果を図-2-1-7 に示す。図より、上が入力した土石流振動波形であり、下に演算処理結果として、立ち上がり波形を関数でフィッティングしたときの相関係数を示した。

センサー取得波形を見ると、時間 370 秒程度以降より、振幅が大きくなり、波形が立ち上がってくることが分かった。ここで、波形取得と同時に演算した相関係数を見ると、波形の立ち上がりに伴い、相関係数が徐々に増加し、係数が 0.8 を超過した(最大値は 0.81)。係数が 0.8 を超過した情報は、無線を介して PC への伝送・受信の処理が実施され、システム動作は問題なかったことが確認できた。これより、振動波形の相関係数を 0.8 と設定することで、土石流を検知することができると考えられる。

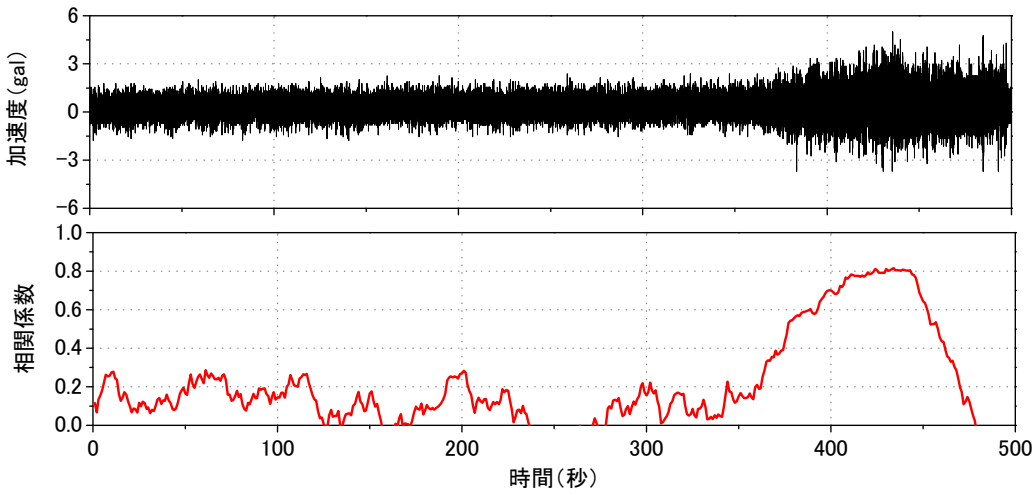


図-2-1-7　土石流検知の検討結果（上：センサーの観測波形、下：相関係数の解析結果）

２）ノイズ棄却の検討

野外での振動センサーの運用にあたっては、ノイズ波形の棄却が課題となると考えられる。運用上のノイズとしては、センサー近傍での人（もしくは動物）の歩行や工事重機に伴う振動、また、落石や地震等による振動が考えられる。そこで、バックホウ走行、人歩行、落石、地震において、観測された波形を入力として、振動台実験を行い、検知アルゴリズムで棄却できるか、検討を行った。それらを図-2-1-8～図-2-1-11 に示した。人歩行、落石、地震においては相関係数が 0.8 を上回ることはなかったが、バックホウに関しては、相関係数が 0.8 を上回っていた。バックホウに関しては、走行中の振動であり、徐々に加速度が増加する傾向があり、波形立ち上がりが指数関数的であったため、相関係数が 0.8 以上となったと考えられる。

相関係数のしきい値を 0.8 とすれば、多くのノイズは棄却されるものと思われるが、今後は、土石流を発生しうる渓流での運用を通じ、閾値の妥当性を検討する必要があると考えられる。

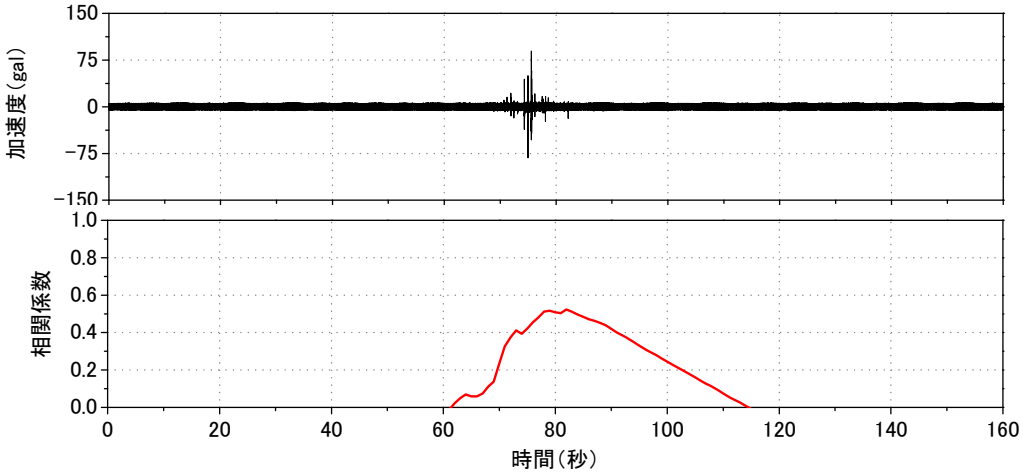


図-2-1-8　人の歩行の検討結果（上：センサーの観測波形、下：相関係数の解析結果）

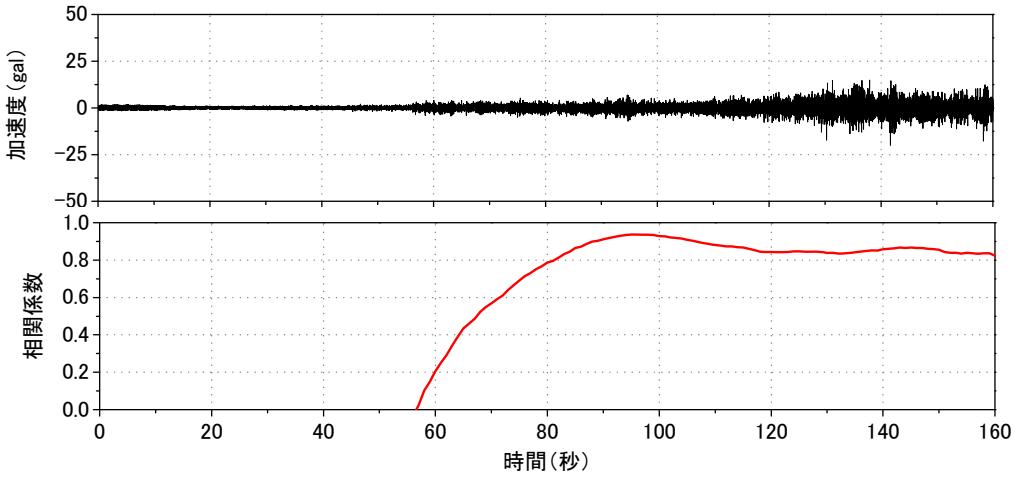


図-2-1-9　バックホウの検討結果（上：センサーの観測波形、下：相関係数の解析結果）

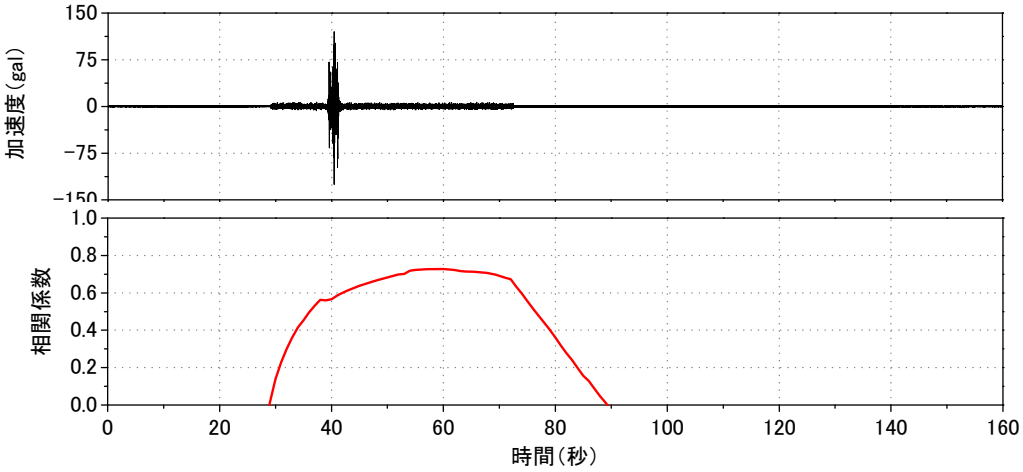


図-2-1-10　落石の検討結果（上：センサーの観測波形、下：相関係数の解析結果）

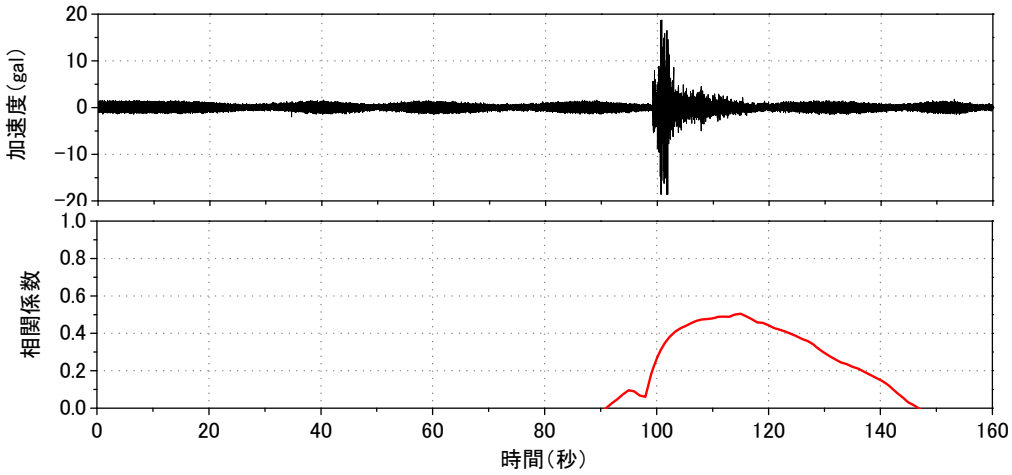


図-2-1-11　地震の検討結果（上：センサーの観測波形、下：相関係数の解析結果）

２．１．５　今後の課題

得られた加速度波形に対し、内部に実装した土石流検知アルゴリズムでリアルタイム演算処理することにより、土石流を検知する無線型振動センサーを開発した。また、室内試験結果より、アルゴリズムや動作の妥当性を検討した。今後は、土石流の発生しうる渓流に設置し、センサーの適用性として、野外での耐久性、設定アルゴリズムやしきい値の妥当性を検討していく必要がある。

２．２　現場汎用型振動センサーの開発

振動センサーはワイヤーセンサーと異なり、土石流を連続して検知できる等のメリットがある反面、振動の振幅値が一般的な土石流発生の閾値となっているため、落石等他の振動ノイズにより誤検知することが考えられる。

そこで、従来の振動センサーの閾値について、振幅だけでなく振動の継続時間をあわせることで、土石流の検知精度の向上が期待できる。さらに、センサーの仕様を土石流検知用に限定することで、低コスト化だけでなく、軽量化、小型化できることが考えられる。それらを踏まえて、ここでは、以下のコンセプトに基づき、振動センサーの検討・開発を行った。

①小型・軽量で、容易に持ち運べ迅速に設置・観測が可能。

②省電力設計で商用電源がない場所においても太陽電池・バッテリー等で動作が可能。

③センサー部を土石流検知に必要な精度に限定し、それに適した静電容量型 MEMS 振動センサーを選定・使用し、機器の価格の低廉化を実現。

④振動の強さおよび振動の継続時間の 2 種類の検知基準により判定することで、検知精度が向上。

⑤土石流の検知レベルは、5 段階まで任意に設定が可能とし、かつ継続時間の設定も任意に設定可能。これらの検知信号により概略の土石流規模の推定が可能。

⑥国土交通省で使用されているデータ伝送装置であるテレメータ無線装置に直接接続可能。

２．２．１　センサー部の選定・精度検証

振動センサーのセンサー部（加速度計）は、開発目標を考慮し、4 種類に絞り込んだ上で（表-2-2-1 参照）、実際の動作試験を実施することで、センサーの選定を行った。

表-2-2-1　比較試験を行った加速度センサー一覧

	タイプA	タイプB	タイプC	タイプD	従来センサー比較検証用 株式会社　拓和【SA-155HT】
検出方法	アンプ内蔵静電容量型加速度センサー	静電容量型MEMS加速度センサー	ピエゾ抵抗型MEMS加速度センサー	静電容量型MEMS加速度センサー	サーボ式加速度計
測定軸	1軸	1軸	1軸	1軸	1軸
測定範囲	±22G	±4G	±2G	±1.7G	±100gal（0.1G）
感度	98mV/G	500mV/G	500mV/G	1000mV/G	15μA／gal
帯域	5～10kHz	0～100Hz	0～200Hz	0.5Hz～2.5kHz間で選択	0.1～50Hz

（1）試験内容・結果

選定した 4 種類のセンサーにおいて、それぞれの特性を把握するため以下の 3 項目に対し試験を行った。また、（株）拓和製の振動センサー（SA-155HT）を比較検定センサーとして同様の試験を行い、4 種類のセンサーと比較とした。

①ノイズレベル測定試験

②温度特性試験

③精度比較試験

1）ノイズレベル測定試験

外部から振動を与えず、そのセンサー自身が持つノイズレベルを半日程度測定した。結果を図-2-2-1 に示す。

・比較検定センサーである拓和製の SA-155HT は、0.5gal 以下のノイズ変動が確認できた。

・タイプ C は 0.5gal から 1gal 程度のノイズ変動と試験 4 種類の中で 1 番ノイズ変動が少なかった。

・タイプ B とタイプ D は、ほぼ同等で、2.5gal から 3.5gal 程度のノイズ変動が確認できた。

・タイプ A は、～9.5gal 程度までノイズ変動が大きく変動した。

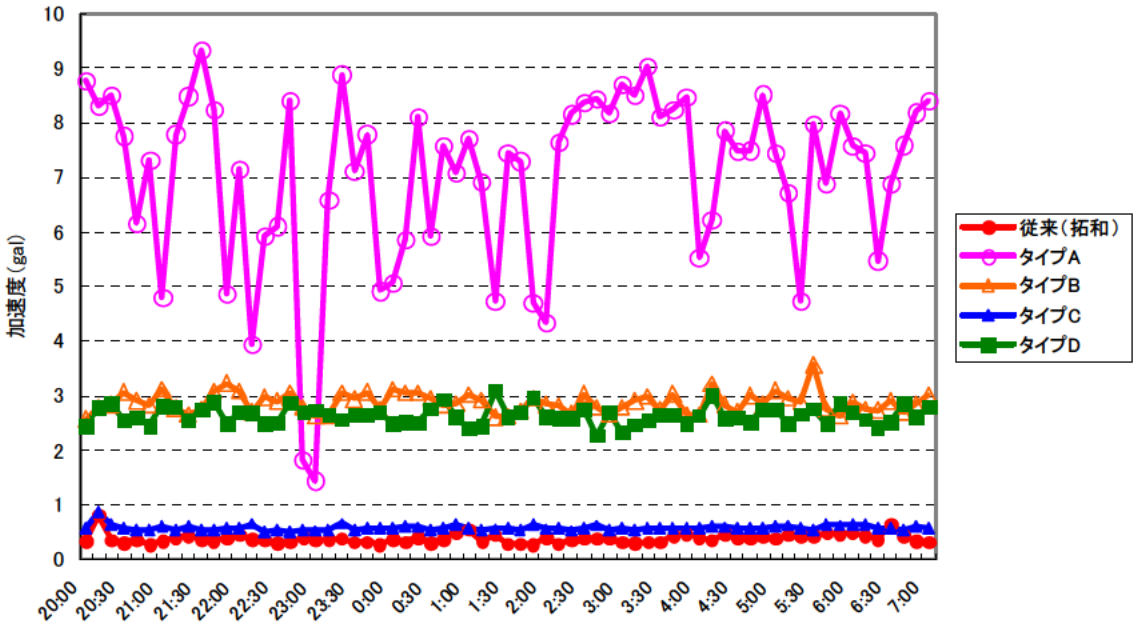


図-2-2-1　ノイズレベル測定結果

2）温度特性試験

温度を自由に変動させることが出来る恒温槽内に、各振動計を設置し、－20℃から+30℃まで、温度を変化させて、センサーの温度特性試験を行った。結果を図-2-2-2 に示す。

・比較検定センサーである拓和製の SA-155HT は温度変化による影響はほとんど見られなかった。

・タイプ D は、温度変化による変動幅は 6gal 程度変動した。

・タイプＢとタイプＣについては、ほぼ同様で、15gal 程度変動した。

・タイプＡは、～40gal 程度と大きく変動した。

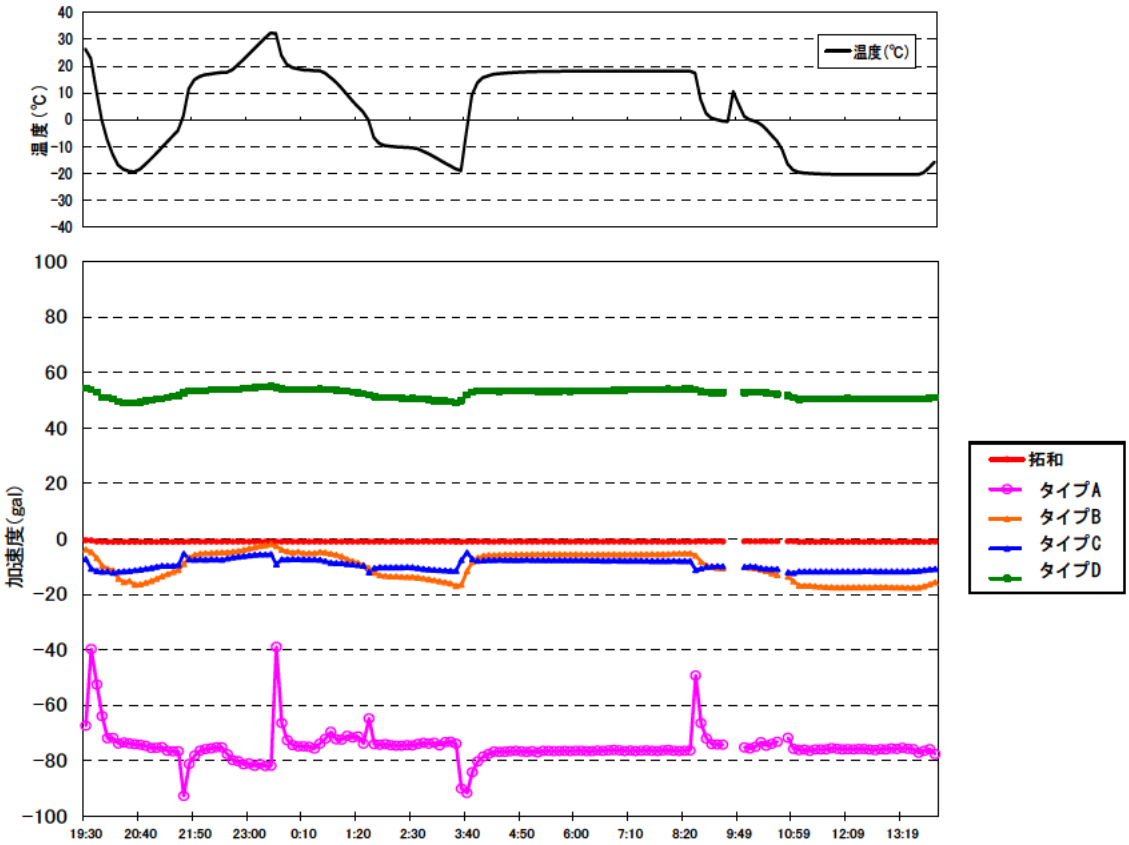


図-2-2-2　温度特性試験結果

３）精度比較試験

重りを一定の高さ（10,20cm の２回）から落とした際の振動を観測し、各センサーの振動の大きさと、比較検定センサーとの振動の大きさの差を誤差として算出した。重りの落下地点と各センサーの計測箇所との距離は約 70cm とした。

①高さ 10cm から重りを落下させた場合（表-2-2-2 参照）

・タイプＢ：最大誤差 2.5gal、誤差平均 1.8gal

・タイプＣ：最大誤差 4.5gal、誤差平均 3.0gal

・タイプＤ：最大誤差 6.8gal、誤差平均 4.8gal

・タイプＡ：最大誤差 16.2gal、誤差平均 13.2gal

②高さ 20cm から重りを落下させた場合（表-2-2-3 参照）

・タイプＢ：最大誤差 4.6gal、誤差平均 2.8gal

・タイプＣ：最大誤差 9.6gal、誤差平均 7.4gal

・タイプD：最大誤差 17.6gal、誤差平均 14.1gal

・タイプA：最大誤差 33.2gal、誤差平均 24.9gal

表-2-2-2　高さ 10cm から重りを落下させた場合の結果（単位 gal）

	拓和	タイプA		タイプB		タイプC		タイプD	
	基準値	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差
1	6.3	16.5	10.3	3.4	2.8	6.6	0.4	10.1	3.8
2	5.7	21.0	15.4	4.3	1.3	8.9	3.2	6.8	1.1
3	5.4	21.4	16.0	3.2	2.2	7.6	2.2	7.4	2.0
4	4.8	20.2	15.4	6.4	1.6	9.3	4.5	9.9	5.1
5	6.1	19.1	13.0	5.1	1.0	10.5	4.4	12.2	6.1
6	6.2	22.4	16.2	6.5	0.3	10.0	3.9	10.9	4.8
7	5.8	15.3	9.5	4.5	1.3	9.6	3.8	12.6	6.8
8	6.0	18.0	12.0	3.6	2.4	9.3	3.3	12.5	6.5
9	6.1	18.1	12.1	3.3	2.8	7.8	1.7	11.9	5.8
10	5.7	18.9	13.2	3.8	1.9	8.8	3.1	11.3	5.6
最大誤差			16.2		2.8		4.5		6.8
平均誤差			13.3		1.8		3.0		4.8

表-2-2-3　高さ 20cm から重りを落下させた場合の結果（単位 gal）

	拓和	タイプA		タイプB		タイプC		タイプD	
	基準値	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差
1	8.0	26.4	18.5	11.6	3.6	17.1	9.1	23.9	15.9
2	6.6	24.4	17.8	8.1	1.5	13.2	6.5	23.0	16.4
3	5.7	28.0	22.3	5.7	0.0	12.8	7.0	18.2	12.4
4	7.9	41.2	33.2	12.5	4.6	13.9	5.9	16.9	8.9
5	7.1	34.4	27.3	11.6	4.5	16.7	9.6	21.9	14.8
6	6.6	29.1	22.5	9.7	3.0	14.7	8.1	22.5	15.8
7	7.1	31.0	24.0	9.1	2.0	14.4	7.4	18.7	11.6
8	7.4	31.5	24.1	7.7	0.3	12.7	5.3	21.3	13.9
9	7.0	39.8	32.8	11.4	4.4	14.7	7.7	24.6	17.6
10	6.7	33.6	26.9	10.5	3.9	14.3	7.6	20.3	13.6
最大誤差			33.2		4.6		9.6		17.6
平均誤差			24.9		2.8		7.4		14.1

（2）センサー部の選定

上記３種類の試験結果の上位をまとめると以下の結果となった。

1）ノイズレベル測定試験

1位　タイプC

2位　タイプB、タイプD

2）温度特性試験

1位　タイプD

2位　タイプB、タイプC

3）精度比較試験

1位　タイプB

2位　タイプC

実際の製品運用において、1）ノイズレベル、2）温度特性は、オフセットをかけることでノイズレベル

や温度による変動を軽減することが可能である事から、全体的な評価の中で３）基準センサーとの精度比較試験を第一と考え、簡易振動センサーのセンサー部はタイプＢを選定した。

２．２．２　振動センサーの試作

目標仕様にかなった変換器を設計・製作を行い、簡易振動センサーの試作器を製作した。図-2-2-1 にその筐体を示す。また、仕様は以下の通りである。

■振動センサー（試作器）の主な機能・仕様

計測項目	:	加速度、水平１方向
センサー方式	:	静電容量型 MEMS 加速度センサー
測定範囲	:	±100gal（最大±3000gal まで調整可能）
警報設定	:	振幅強度＋継続時間
		振幅強度：5 段階設定（5～測定範囲（gal)）
		継続時間：1～10 秒間設定（今回設定：1 秒間）
出　力	:	アナログ:１量（±5V)、
		警報接点:5 量（5 段階設定）
		警報接点 OR:１量
		電圧低下:１量
		ｽﾀｰﾄﾊﾟﾙｽ:１量
フィルター	:	ローパスフィルター（10,50,100Hz 選択）
		DC 成分カットフィルター
センサー部寸法	:	W160×H100×D160（mm）
電　源	:	DC12V（10.5～16.5V)：今回、太陽電池＋バッテリー使用
消費電流	:	平常時 110mA 以下
ログ記録	:	警報出力変化時、電源投入時：最大 2781 レコードまで
波形記録	:	当該センサーには搭載していないため、別途記録装置にて記録

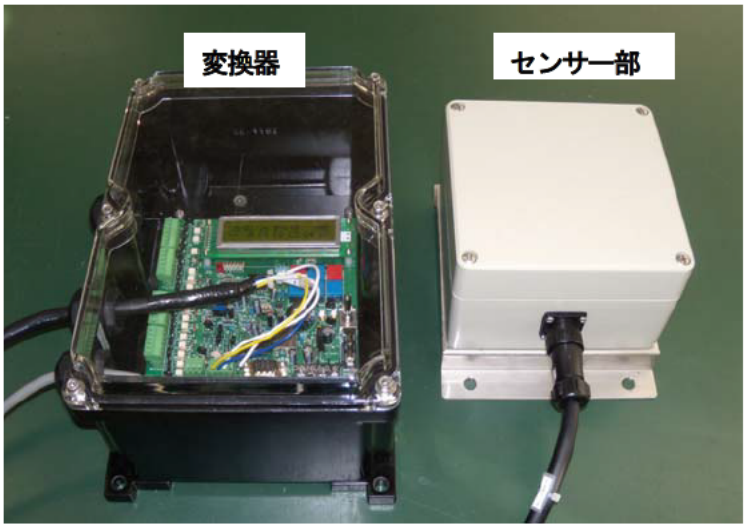


写真-2-2-1　簡易型振動センサー試作器外観

また、試作器でのノイズ測定を行ったところ、センサー自身のノイズと電源、ケーブルに起因するノイズ（最大約 6gal 程度）の発生を観測した。

このノイズの対策を行った結果、3gal 程度までノイズ発生が抑えられたことから、警報レベルは 4-5gal 程度から設定可能であると考えられる。

２．２．３　振動センサーの現地観測

試作・開発した振動センサーの実用化の検討を行うため、実際の土石流発生の可能性が高いと考えられる国土交通省大隅河川国道事務所管内桜島野尻川に設置し、現地観測を行った。

（1）現地観測概要

設置・観測開始：　平成 22 年 7 月 2 日（金）～

場　　所：　国土交通省九州地方整備局大隈河川国道事務所管内
桜島野尻川 8 号砂防堰堤右岸巻き止め護岸上（図-2-2-3 参照）

試験目的：　振動センサーの現地検証および振動波形観測

試験装置：　振動センサー　1 式　（太陽電池、バッテリー、携帯電話伝送装置等：詳細はシステム構成図参照）

図-2-2-3　桜島と振動センサーの位置図（センサーから河道の流心までの距離は約 30m）

（2）設置・施工状況

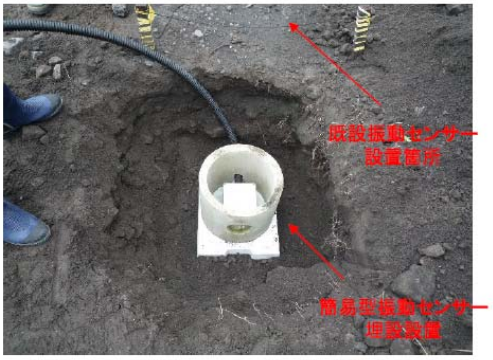
センサー設置の状況を写真-2-2-3～写真-2-2-4 に示す。システム構成図を図-2-2-4 に示す。

振動センサー（上）と変換器（下）
（装置前面にあるのは野帳）

振動センサー設置状況
センサーはコンクリートブロックに
設置して、地中50cm内に埋設

写真-2-2-2　設置状況①

センサー設置用埋設穴掘削



センサー設置①

センサー設置②

センサー埋め戻し

写真-2-2-3　設置状況②

簡易型振動センサー変換器

装置収納状況①

装置収納状況②

変換器等収納簡易ボックス

写真-2-2-4　設置状況③

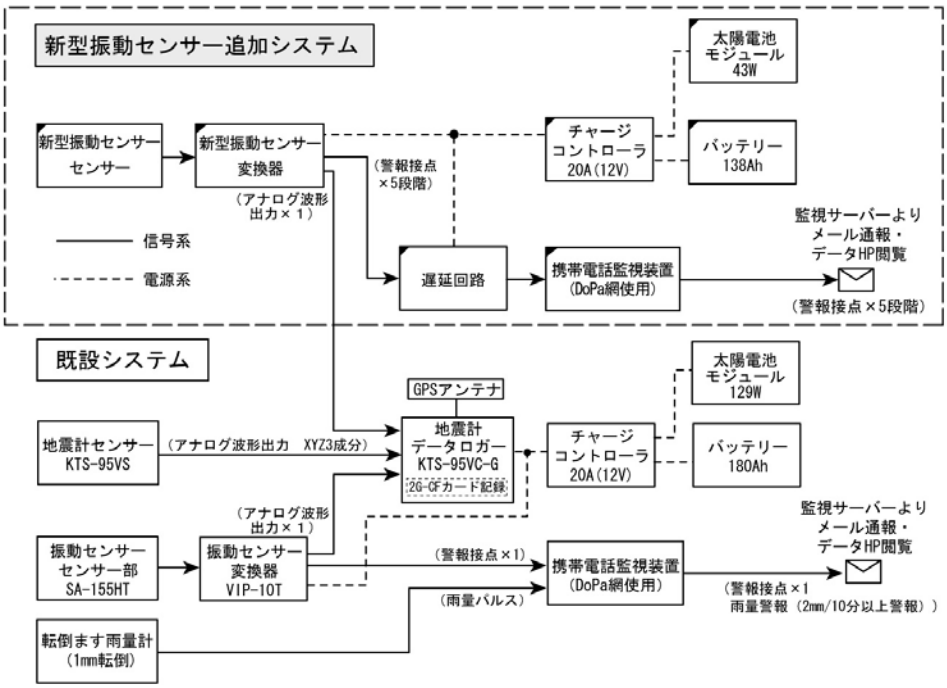


図-2-2-4　システム構成図

（3）メール配信・ＨＰデータ閲覧

簡易振動センサーの警報信号は、携帯電話伝送装置によりメールで配信することができる。また、ＨＰ上でも警報接点の発報状況や雨量等の閲覧ができる。(図-2-2-5 参照)。

配信メール例

HP画面例

図-2-2-5　ＨＰ閲覧・メール配信画面例

（4）機器特性・振動減衰特性の確認

既設の振動センサーと簡易振動センサーの機器の特性の比較や、地盤の減衰特性を解析するために、ラン

マーやボーリング玉を振動源とした、機器特性・振動減衰試験を行った（写真-2-2-5 参照）。振動源の位置は、横断方向（センサー近傍から対岸までの約 50m 間を約 5m 毎に実施）、縦断方向（堰堤から上流方向へ約 60m 間を約 5m 毎に実施）の２パターン設定し、各位置で発生させた振動を観測した。その結果を図-2-2-6、2-2-7 に示す。

ランマーによる減衰特性試験①

ボーリング玉による減衰特性試験①

ボーリング玉による減衰特性試験②

写真-2-2-5　減衰特性試験の状況

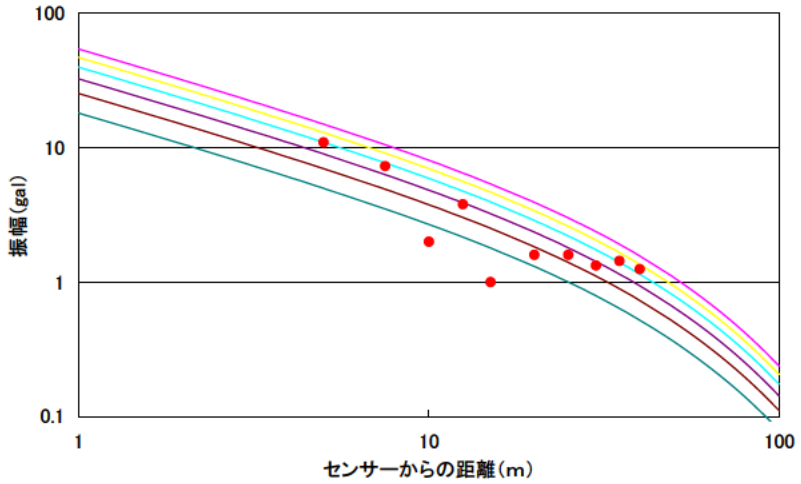


図-2-2-6　野尻川８号堰堤における振動減衰傾向と内部減衰定数（α＝0.02）【横断方向】

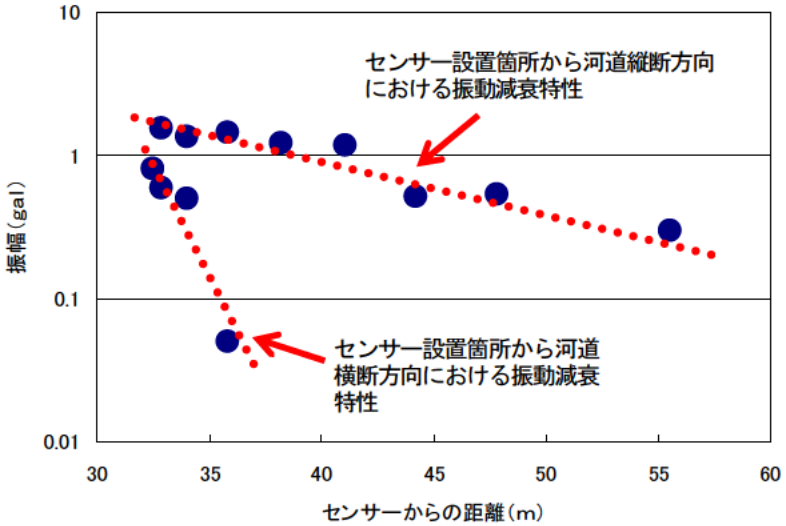


図-2-2-7　野尻川８号堰堤における振動減衰傾向【縦断方向】

横断方向に振源を移動し計測した結果を縦軸に振幅、横軸に距離を示した結果を図-2-2-6 に示す。幾何減衰定数をｎ=0.75 とし、地盤内部減衰定数αを変化させ距離減衰式を用いて振動の減衰傾向を検討した結果、横断方向の地盤内部減衰定数α=0.02 は現地の減衰傾向を最も良く再現できた（参照）。この結果は既往の地盤振動減衰試験を行った結果（α=0.02～0.04）と一致し、内部減衰特性の違いがほとんどないことが確認できた。

センサー設置箇所から河道縦断方向と河道横断方向の振動減衰特性を図-2-2-7 に示す。図より、振動の減衰は横断方向の方が縦断方向よりも大きいことがわかった。これは、河道横断方向の測線上には巻き止め護岸が設置されており、護岸によって横断方向の測線上で数mの高低差が生じたため、その影響により減衰が大きくなったものと考えられる。

既設の振動センサーと簡易振動センサーの観測データの比較において、記録された計測波形において、ほぼ同様の波形が記録されている事が判明した。また、図-2-2-8 より、簡易振動センサーは、既設の振動センサーより常時ノイズが大きい（±2～3gal 程度）ことがわかる。

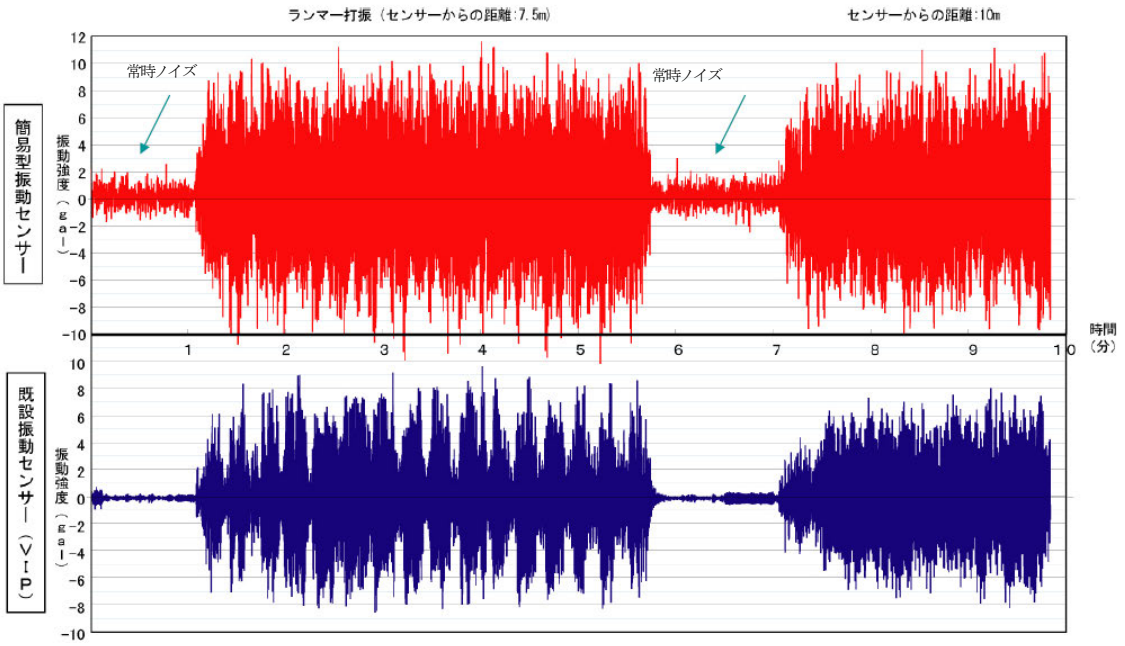


図-2-2-8　収集データ比較波形

（5）土石流観測状況

1）機器の特性評価および土石流観測データでの比較検討

観測した土石流振動データから既設の地震計・振動センサーとの比較検討を行った（図-2-2-9 比較波形参照）。

土石流の振動は 16:20 頃から大きくなり 16:50 程度まで続いている。地震計、従来の振動センサー、新型振動センサーともほぼ同様な波形形状（振動レベル・ピーク位置・継続時間等）が観測されており、新型振動センサーの土石流観測は従来のセンサーと比べて同程度の観測が可能であることが確認できた。

なお、常時ノイズは、新型振動センサーは±2～3gal 程度と従来の振動センサーよりも常時ノイズが大きいが、表-2-2-4 に示す新型振動センサーが検知した土石流の加速度は 2～3gal より大きな振動を観測していることから、2～3gal 程度の常時ノイズは運用上支障ないと判断できる。

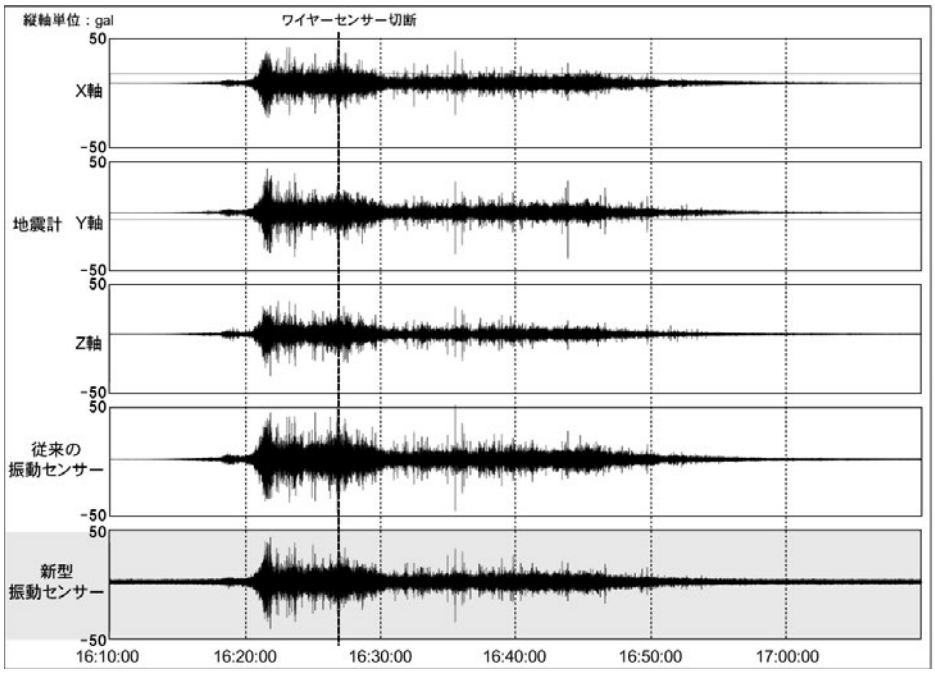


図-2-2-9　既設センサーとの比較波形（H22.10.24 土石流）

2）土石流検知状況の検証

表-2-2-4　桜島野尻川の土石流の発生と検知状況一覧

	土石流発生（ﾜｲﾔｰｾﾝｻｰ検知による）		新型振動センサー						従来型振動センサー					
	月日	時刻	検知状況	検知時間（第1報）	最大振幅	閾値以上継続時間	閾値設定	遅延時間	検知状況	検知時間（第1報）	最大振幅（gal）	閾値以上継続時間	閾値設定	遅延時間
1	7月9日	5:00	×	検知なし	11gal	－	警報①：5gal 警報②：7gal 警報③：10gal 警報④：15gal 警報⑤：20gal（警報は5段階）	3秒	○	4:58	9gal	2分	警報①：7gal（警報は1段階のみ）	瞬時
2	7月14日	16:12	×	検知なし	27gal	－			○	15:51	19gal	39分		
3	7月28日	22:08	○	22:05	33gal	12分		1秒	○	22:05	21gal	19分		
4	8月18日	15:24	○	15:17	27gal	11分			○	15:17	26gal	15分		
5	8月28日	3:34	○	3:32	34gal	21分			○	3:31	34gal	26分		
6	9月7日	14:58	○	14:58	21gal	7分			○	14:55	21gal	20分		
7	10月24日	16:27	○	16:21	41gal	24分			○	16:21	48gal	29分		

国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所によると、現地観測を開始した平成 22 年 7 月から平成 23 年 1 月までに土石流は計 7 回発生（表-2-2-4 参照）している[15]。

その中で新型振動センサーは土石流を 5 回検知することができた。なお、7 月 9 日、14 日の土石流の際は遅延時間を 3 秒にしていたが、その後遅延時間を 1 秒に変更した結果、その後発生した 5 回の土石流をすべて検知することができた。また、ワイヤーセンサーが検知しない小規模の土砂流出（監視カメラ映像より確認）も 2 回検知しており、小規模な土砂移動現象も検知することができると考えられる。

一方、9 月 28 日の既設堰堤での除石工事中に誤検知が 1 回確認された（写真-2-2-6）。今後最適な設定値

等による精度の向上の検討を行っていく予定である。

なお、新型振動センサーは振動レベルに応じて 5 段階の警報が出力され、この出力を伝送装置（本現地観測においてはメール送信）で伝送する事により、遠方でも警報時間・レベルを整理することが可能である。図-2-2-10 は監視カメラ画像から判読した土石流の流量と土石流振動波形および警報メールから推察できる土石流の定性的な規模について比較したものであり、その大小関係は概ね同様の傾向を示している。本システムを用いることで、概略ではあるものの流出規模の把握が可能であると考えられる。なお、他の事例については土石流振動波形と警報メールから推察できる土石流の規模を示す（図-2-2-11～図-2-2-13 参照）。

写真-2-2-6　検知時の除石工事状況（H22.09.08）

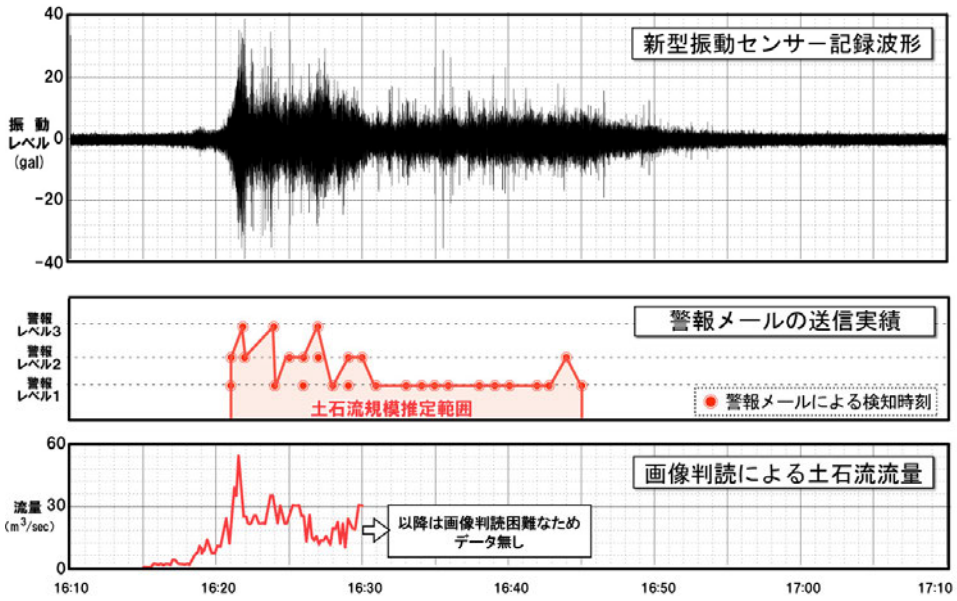


図-2-2-10　振動波形・警報メール・流量比較（H22.10.24 土石流）

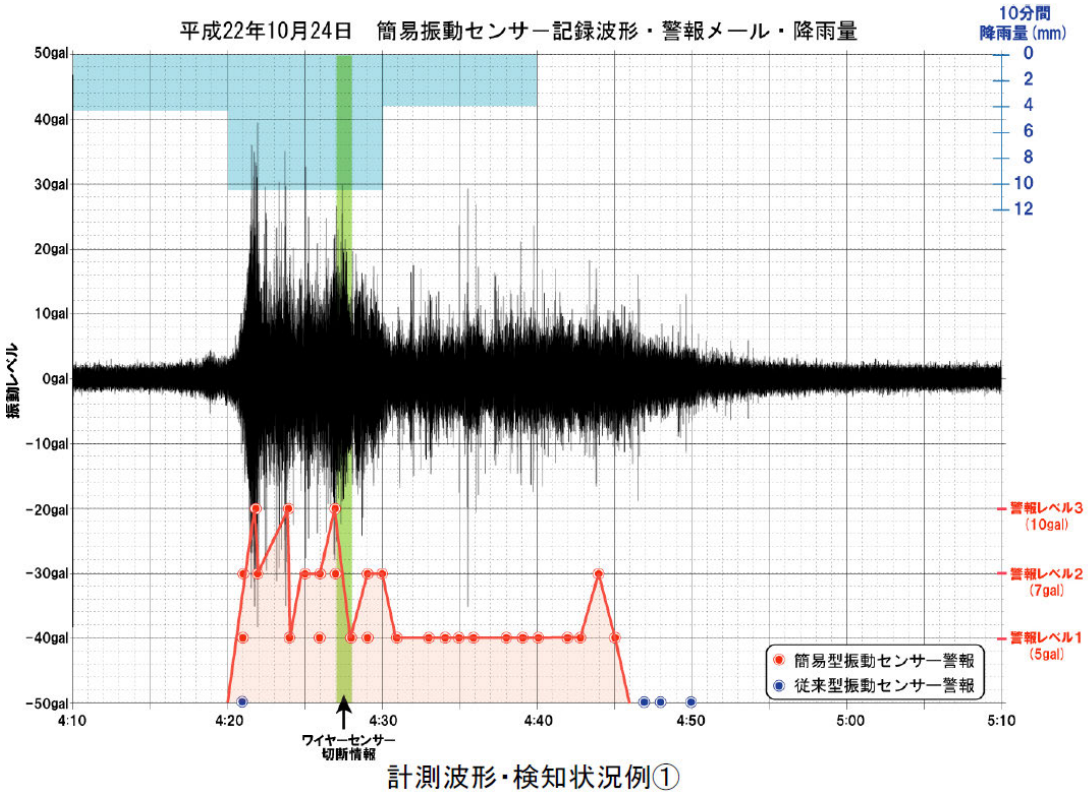


図-2-2-11　振動波形・警報メール・雨量比較①

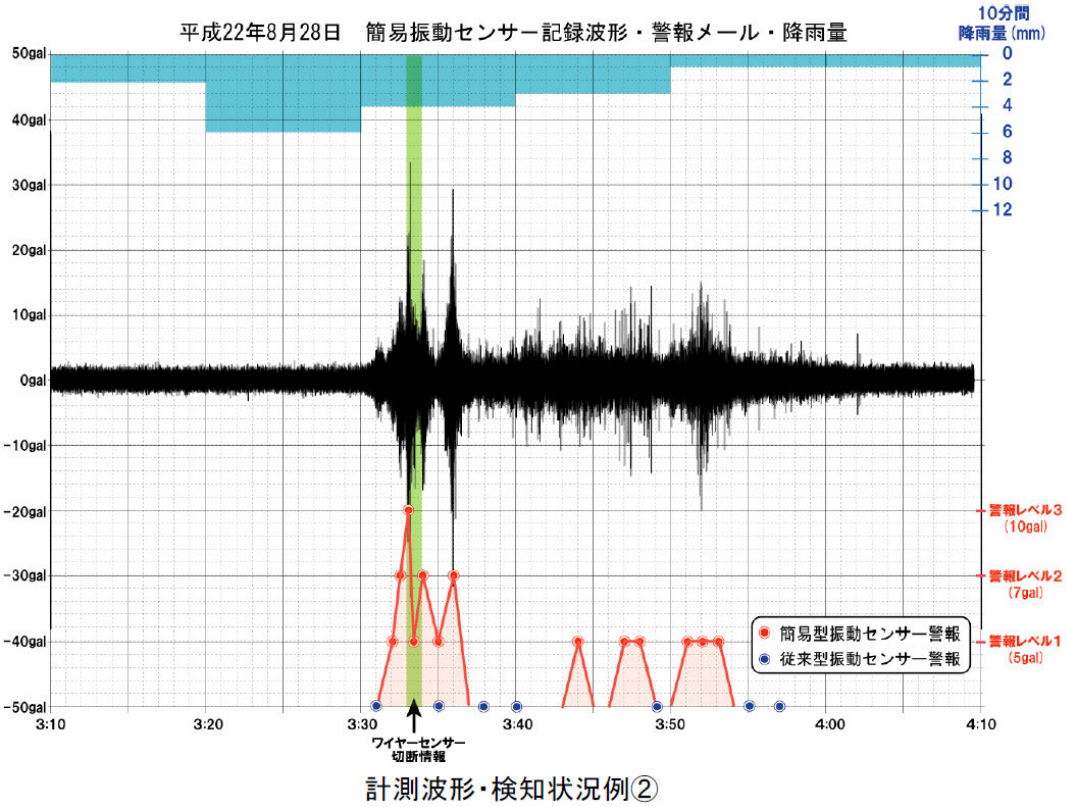


図-2-2-12　振動波形・警報メール・雨量比較②

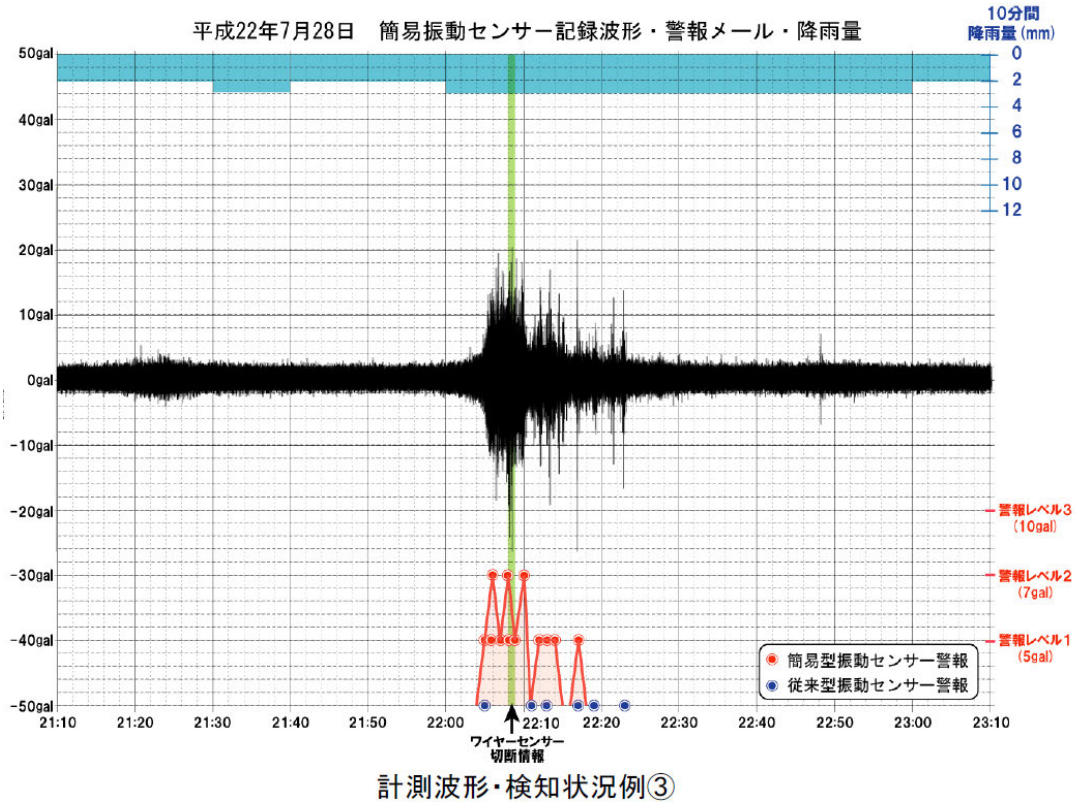


図-2-2-13　振動波形・警報メール・雨量比較③

２．２．４　まとめ

簡易振動センサーを開発・試作し実用化に向けて現地観測を行った。桜島における土石流検知において、ほぼすべての土石流の発生が検知することができ、警報メールのレベルと受信時間を確認することで、概ねの発生規模を把握できると考える。この試験結果を踏まえて、全国的な普及を考慮し、試作簡易振動センサーの回路・外形・処理ソフト等を見直し、標準生産可能である製品化を行った。センサー部の仕様等を表-2-2-5、図-2-2-14、変換機の仕様等を表-2-2-6、図-2-2-15 に示す。

今後は、全国的な販売・普及に際し得られた検知実績やデータ、設置や運用に関する要望、問題点の解消等を行い、さらなる精度や信頼性の高いセンサーにしていくことを目指したい。

写真 2-2-7　簡易振動センサー外観

(左：センサー部、右：センサー変換器)

表-2-2-5　簡易振動センサー仕様

項　目		仕　様	
1	型　名	ＴＳＶ－０４Ｈ	
2	機　能	1）加速度センサー	センサー方式　静電容量型 検出方向　水平１軸
		2）測定範囲	０．０５～２ｍ／ｓ^2（５～２００ｇａｌ）
		3）周波数帯域	０～１００Ｈｚ
		4）感　度	５００ｍＶ／Ｇ
3	動作電源電圧	ＤＣ１２Ｖ（変換器より供給）	
4	環境条件	－２０℃～＋５０℃（但し、凍結しないこと）	
5	構　造	防水・防塵構造（ＩＰ６５）	
6	寸　法	１５０Ｗ×８５Ｈ×１０２Ｄｍｍ（但し、突起部は含まず）	
7	質　量	２．０ｋｇ以下	
8	ケーブル	５０ｍ（専用コネクタ付ケーブル）	

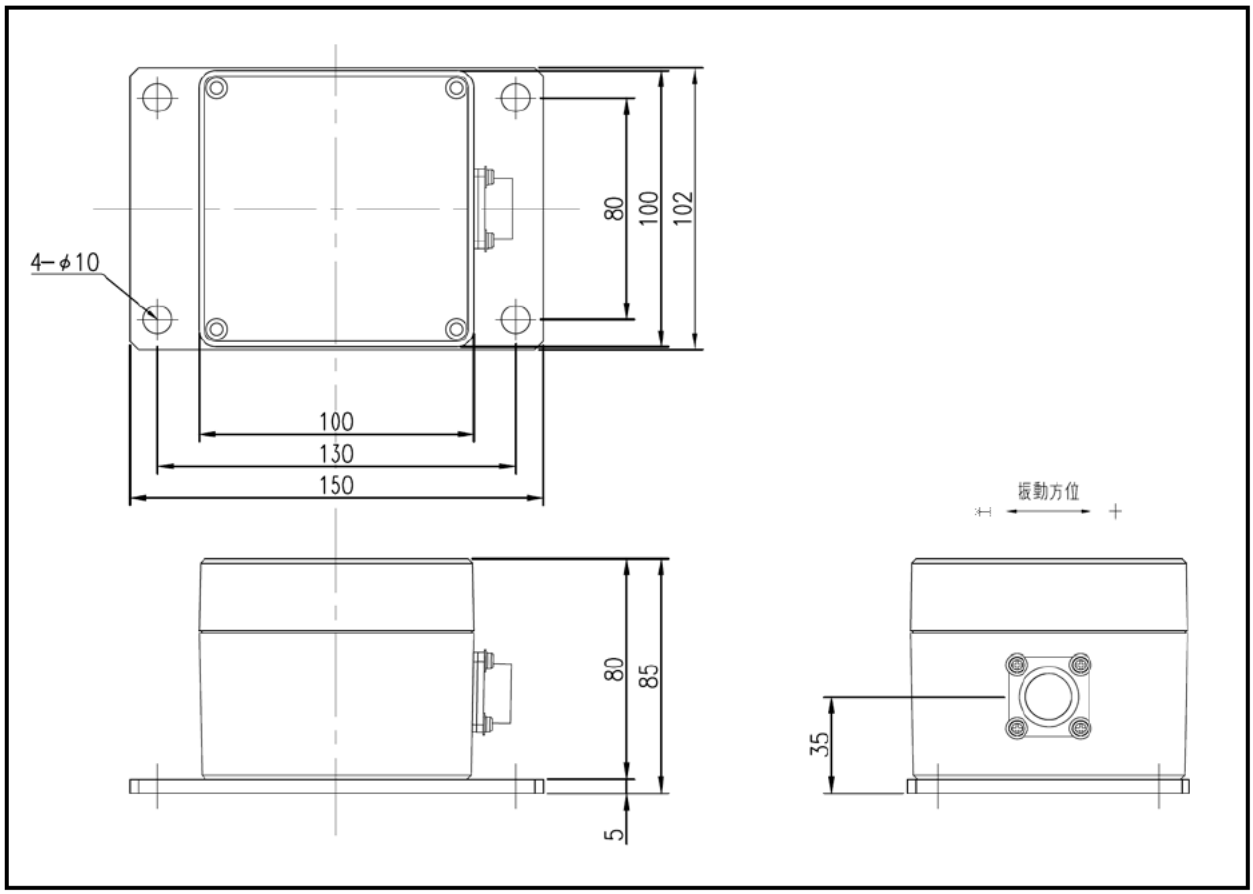


図-2-2-14　簡易振動センサー外形図

表-2-2-6　簡易振動センサー変換器仕様

項　目		仕　様	
1	型　名	ＴＳＶ－０１Ｃ	
2	機　能	１）周波数特性	ローパスフィルター（10Hz、50Hz、100Hz から設定） ＤＣ成分カットフィルター（1Hz）
		２）測定範囲	０．０５～２ｍ／ｓ^2（５～２００ｇａｌ）
		３）警報設定（レベル）	加速度レベル５段階設定　０．０１ｍ／ｓ^2（１ｇａｌ）単位 測定範囲での設定が可能
		４）警報設定（継続時間）	検出時間　１～１０秒（１秒単位）
		５）警報出力条件	警報設定（レベル）以上のレベルが警報設定（継続時間）以上 連続した場合に警報出力する。（最短出力１秒）
		６）警報接点出力時間	警報出力条件を満たしている時間＋警報接点延長時間
		７）警報接点延長時間	０～６０秒（１秒単位で任意設定）
		８）接点出力	警報接点　５点×２量　　警報接点（ＯＲ）　１点×２量 電圧異常　１点×２量　　スタートパルス　　１点×２量
		９）接点出力形式	無電圧Ａ接点（フォトＭＯＳリレー出力） 最大２００Ｖ（ＡＣ／ＤＣ）２００ｍＡ
		10）アナログ出力	±５Ｖ　１量
		11）イベントログ記録	電源投入時、警報出力変化時：最大 500 レコード（LCD 表示）
3	動作電源電圧	ＤＣ１２Ｖ（１０．５～１６．５Ｖ）	
4	消費電流	常時１００ｍＡ以下	
5	環境条件	周囲温度 -10℃～+50℃（液晶表示を除く）、周囲湿度 30%～90%（但し結露しないこと）	
6	構　造	屋外壁掛け型（保護等級ＩＰ６５）	
7	材　質	ボデー・ドア：樹脂（PC+ABS）、取付金具：樹脂　（PBT+PC-GF30）	
8	色　彩	ライトベージュ（マンセル５Ｙ７／１）	
9	寸　法	２００Ｗ×３００Ｈ×１６５Ｄ mm　（取付金具等の突起部は含まず）	
10	質　量	３．０ｋｇ以下	

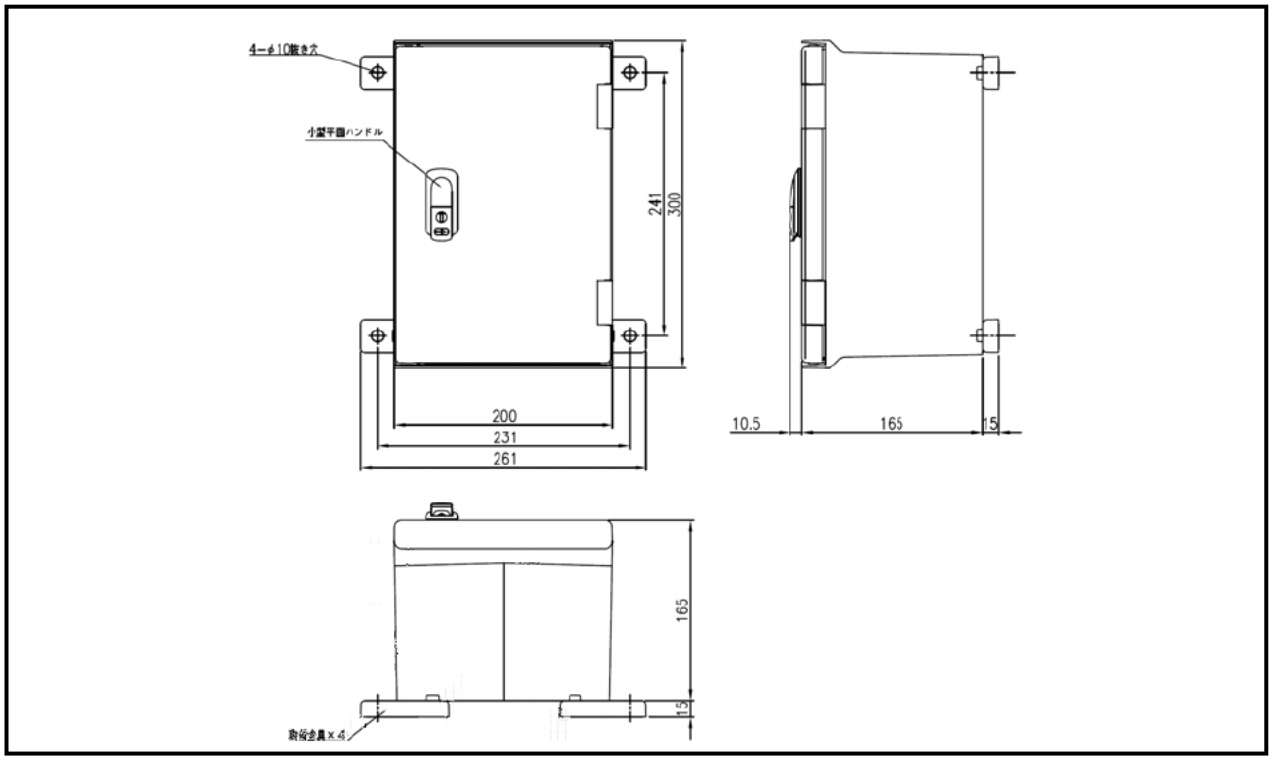


図-2-2-15　簡易振動センサー変換器外形図

２．３　無線運用型振動センサーの開発

２．３．１　背景

土石流検知センサーは、一般的に対象渓流ごとに１基ずつ設置する。一方、センサー単体の運用は、土石流以外の事象による誤検知によるリスクが生じうるため、２．１、２．２では、振動センサーの検知手法を高度化させて、誤検知を可能な限り回避することを目的に開発を行った。

ここで、振動センサーの誤検知を回避する方法として、振動センサーを対象渓流に上下流に設置することで、センサーの発報時刻の差から土石流の発生を判断することが提案されている[16]。このアイディアは有効である一方、振動センサーを複数機設置することを前提としているため、システムのコストが割高になることや、ケーブルの敷設等実際の設置における労力が増えることが想定される。

そこで、表-2-3-1 の解決策をコンセプトとして複数機を同時に運用できる安価な振動センサー（無線運用型振動センサー）を開発することとした。

表-2-3-1　センサー開発の課題と解決策

課題	解決策
複数台のセンサーが必要な場合、費用が高くなる。	センサー単体の価格を下げて、複数台のセンサーを運用できるようにする。そのために、センサーの仕様は振動センサーとして必要最小限とする。
複数台のセンサーに対し、受信機が複数台必要な場合、費用が嵩む。	1 基の装置（受信機）で複数台のセンサーを同時に管理できるようにする。
センサー数が増える場合、ケーブルの敷設等設置の負担が増える。	センサーと受信機間の信号通信は無線を導入する。
山岳地に設置する場合、商用電源が確保できない場合がある。	低消費電力なセンサーとし、電池で駆動する。

２．３．２　無線式振動センサーの開発

（1）無線式振動センサーに関する検討

無線式振動センサーの検討事項を以下に示す。

1）開発フロー

無線式振動センサーの開発フローを図-2-3-1 に示す。振動検知部に用いる安価なセンサーを選定し、土石流発生の有無の信号を伝送する無線通信方法の検討を行う。その後、試作した製品の基本性能試験を行い、現場にて検証試験を行う。

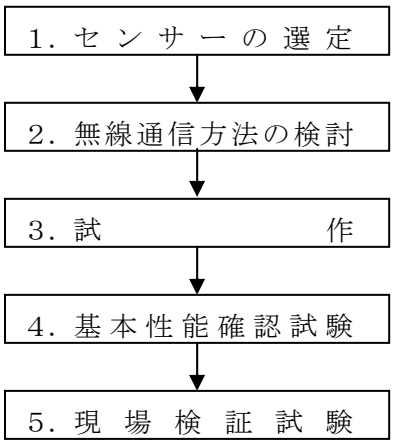


図-2-3-1　開発フロー

2）センサーの検討

近年は、MEMS（Micro Electro-Mechanical System）などの安価な加速度センサーなどが入手できるようになってきている。これらのセンサーを利用し、データの取得ではなく土石流発生の有無の信号のみを伝送するように機能を限定することにより、安価な振動センサーを開発することを目標とした。

振動センサーとしては表-2-3-2 に掲げるセンサー方式が考えられ、前述のコンセプトである安価・小型化・省消費電力の観点から評価した結果、ピエゾフィルム型のセンサーを採用した。

表-2-3-2　主な振動センサー検討一覧

種別	ピエゾフィルム型	圧電型センサー	静電容量型	サーボ型
型式	LDTC-100	SA12SC	Model2210-002	CXL04GP1
電圧感度	1.1V/G	1.1V/G	2V/G	0.5V/G
消費電流	3mA	10mA	10mA	3mA
コスト	¥3,000	¥30,000	¥75,000	¥33,000
特徴	小型化が図れる 温度ドリフトあり	電源が不要 増幅器が必要	温度特性が良い アンプが必要	高性能・高精度 電源が必要
目的に合うセンサー	◎	○	△	○

3）無線通信方法の検討

信号の通信にケーブルを使用した場合、①断線で計測不能になる、②誘導雷で機器が故障する、③ケーブル敷設にコストがかかるという問題がある。近年は、信号の伝送に無線 LAN、特定小電力無線通信といった免許を必要としない無線通信が利用できるようになっており、これらを利用することによりケーブル敷設によるコストの問題は解決できると考える。そこで、信号の伝送に無線通信を用いる土石流検知センサーを

開発することを目標とした。

無線通信は、表-2-3-3 に掲げる通信方式を候補とするが、この中でトータルコスト、消費電力の観点から検討を進め、特定小電力無線（接点）方式を採用した。

表-2-3-3　無線通信方式検討一覧

無線方式	特定小電力無線（接点）	特定小電力無線（データ用）	Zigbee（ジグビー）	無線 LAN
使用周波数帯	420～430MHz 帯	420～430MHz 帯	2.4GHz 帯	2.4GHz 帯
通信距離	800m	1000m	70m	100m
消費電力	10mA	50mA	50mA	100mA
制御用 CPU	不要	要	要	要
トータルコスト	3 万円程度	6 万円程度	1 万円程度	2 万円程度
特徴	消費電力が低い アンテナで通信距離を伸ばせる	消費電力が低い アンテナで通信距離を伸ばせる	ルーティングが必要。通信距離が短い	通信距離が短い 通信速度が速い
目的に合う通信方式	◎	○	×	△

（3）開発した無線式振動センサー

1）無線式振動センサーの概要

開発した無線式振動センサーの概要を図-2-3-2 に示す。センサーは流心、堰堤巻き止め護岸などに設置し、受信器は土石流によって流出されない位置に配置する。土石流が発生したら土石流発生の有無の信号はセンサーから無線で発信される。なお、センサーの識別はセンサー毎に持っている ID で行う。携帯電話回線、公衆電話回線などを用いて事務所に検知信号を転送することも可能なシステムとする。

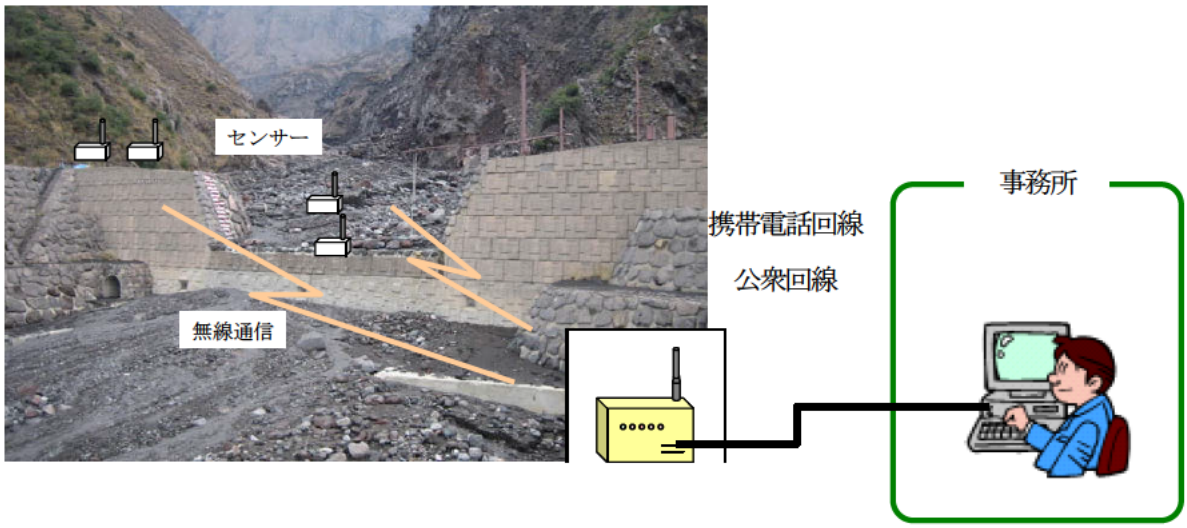


図-2-3-2　無線式振動センサー概要

2）システムブロック

無線式振動センサーのシステムブロック例を図-2-3-3 に示す。図より、開発した無線式振動センサーのシステムは、5 台のセンサーを管理できる受信器をセンサーからの信号が届く位置に配置し、センサーからの信号を一元的に管理するシステムとした。なお、システムはセンサー1 台から構築することが可能である。テレメータはあらかじめ光ファイバや携帯電話回線等を用いて事務所等まで検知信号を転送できるようにする必要がある。

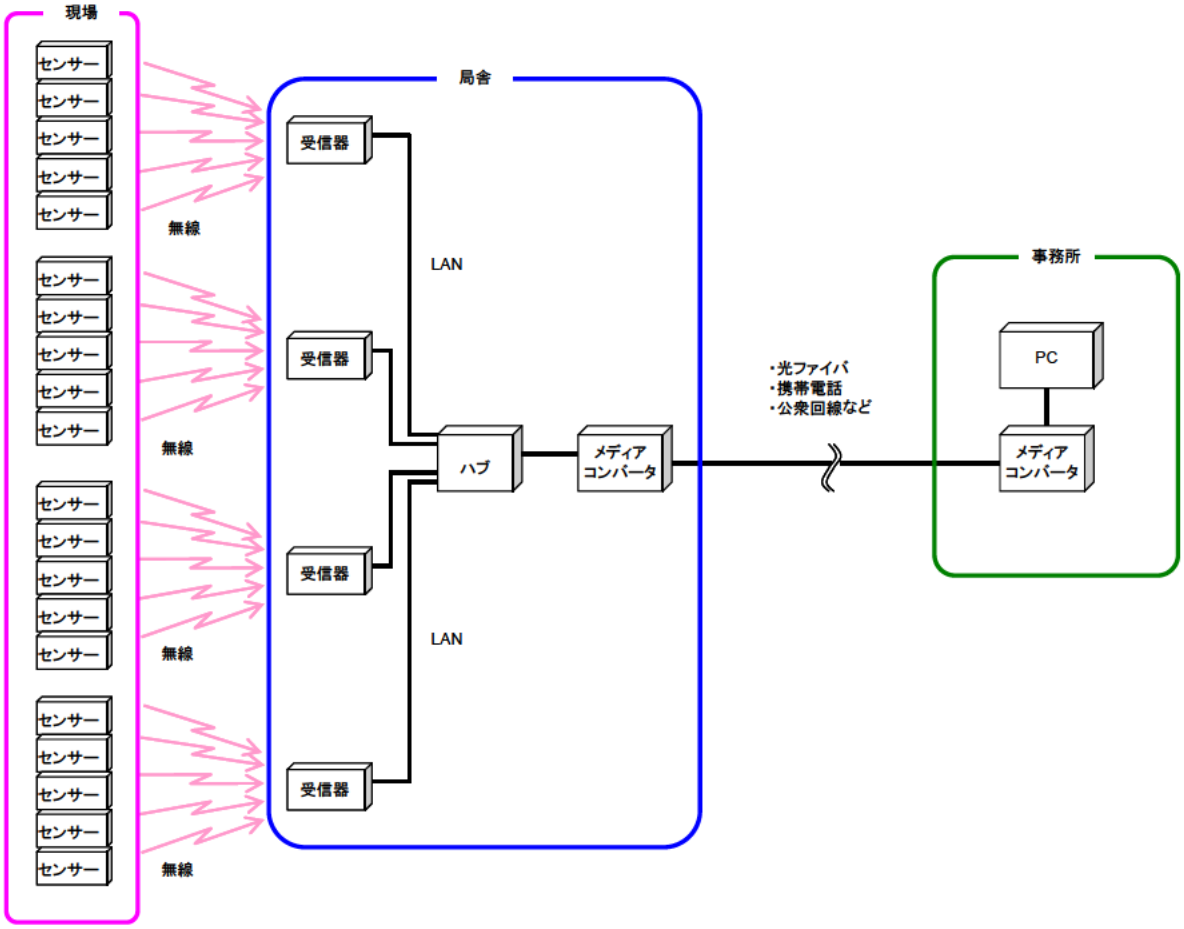


図-2-3-3　システムブロック例

3）振動検知部

無線式振動センサーに使用した検知素子の動作原理を図-2-3-4、仕様を表-2-3-4 に示す。

振動検知部に用いる検知素子は、開発目標の１つにある安価なものということを考慮し、ピエゾ抵抗型の振動センサーを選定した。この検知素子は、垂直方向の加速度をカンチレバー先端のウエイトの慣性による曲げとして検知する。カンチレバーの曲げは圧電素子の反応として、電極を通して電圧として出力される。

上記の検知素子を組み込んだ無線式振動センサーの原理は、あらかじめ所定の検知レベルを設定し、その検知レベルを超えた時点で接点信号を出力することにより、土石流を検知する。

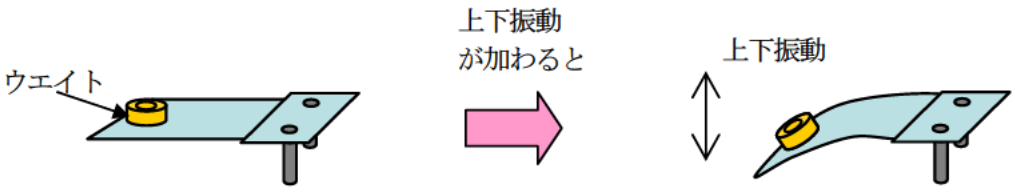


図-2-3-4　センサー動作原理

表-2-3-4　センサーの仕様

振動センサー	
電圧感度	1.1V/g
振動数範囲	42Hz
共鳴周波数	75hZ

4）センサー・受信器間の無線通信部

無線通信の仕様を表-2-3-5 に示す。無線通信方法は消費電力を抑え、免許を必要としない無線通信方法の中でも比較的距離が長い特定小電力無線通信方法の単向通信方式を採用した。

表-2-3-5　無線通信の仕様

特定小電力無線通信（接点）	
送受信周波数	426.025Hz
通信方式	単向通信
通信距離	500m

5）仕様、外観図

開発した無線式振動センサーの外観写真を写真-2-3-1、外観寸法を図-2-3-5、仕様を表-2-3-6 に示す。このセンサーの中に、振動検知部、無線モジュール、単一アルカリ乾電池 4 本が内蔵されている。

受信器の外観写真を写真-2-3-2、外観寸法を図-2-3-6、仕様を表-2-3-7 に示す。この受信器 1 台で管理できるセンサーの数は 5 台である。また、受信器を増設することで、5 台以上のセンサーを運用することができる。

写真-2-3-1　無線式振動センサー外観

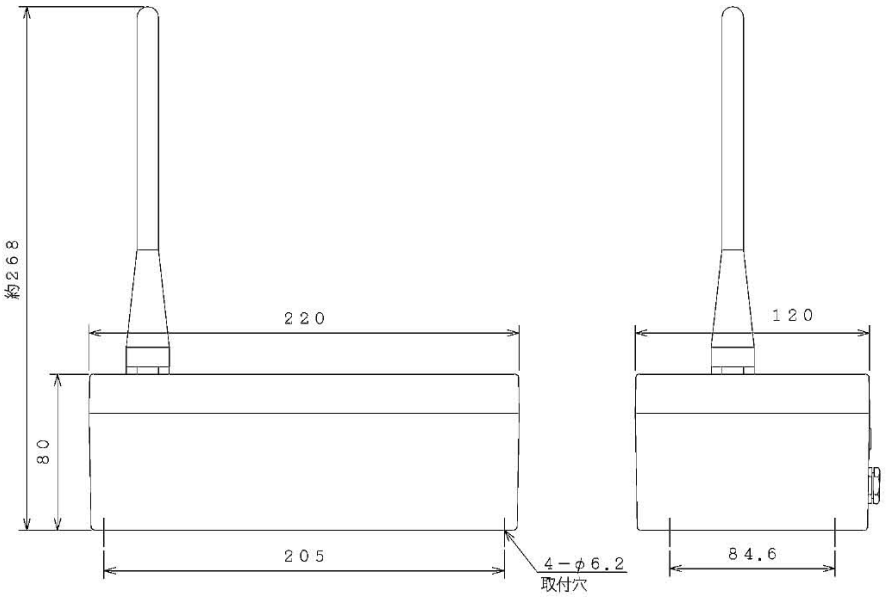


図-2-3-5　無線式振動センサー外観寸法図

表-2-3-6　無線式振動センサー仕様

項目		仕様
1	検知方式	振動検知
2	検知レベル調整範囲	1～2000gal
3	検知レベル分解能	1%F.S
4	周波数検知範囲	100Hz 以下
5	共振周波数	75Hz
6	検知時間	100ms 以内（検知から送信開始までの時間）
7	通信方式	特定小電力無線（426.025MHz） 検知直後に ID とチャンネルを 100ms 送信
8	通報距離	最大 500m
9	電源	単一アルカリ電池 4 本（DC6V）
10	使用期間	3 ヶ月間（検知条件：20 回/日を想定）
11	保護等級	IP67 相当
12	使用温湿度範囲	-10～50℃、85%RH
13	質量	約 2.5kg

写真-2-3-2　受信器外観

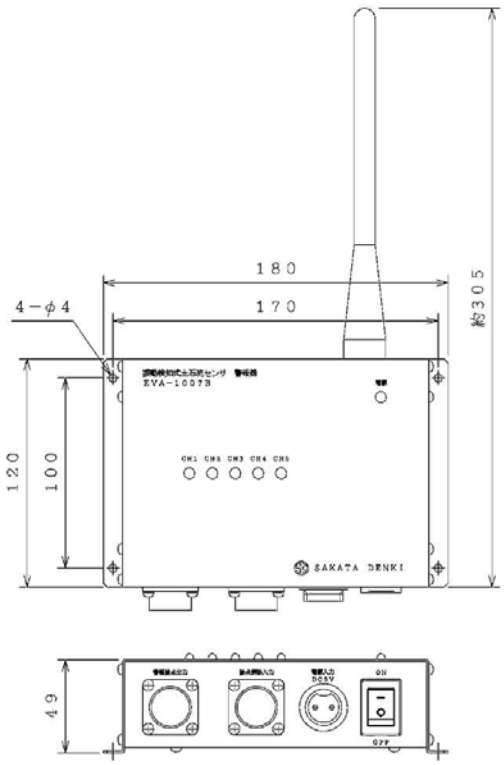


図-2-3-6　受信器外観寸法図

表-2-3-7　受信器仕様

項目		仕様
1	通信方式	特定小電力無線（426.025MHz）
2	受信可能距離	最大 500m（環境によって異なる）
3	LED 出力	5 チャンネル
4	接点出力	5 チャンネル　フォト MOS リレー出力 （100V、0.5A）
5	解除接点入力	5 チャンネル　無電圧接点 （入力センス電流　約 0.5mA）
6	電源	付属 AC アダプタ（DC5V）
7	消費電力	500mW
8	使用温湿度範囲	-10～50℃、85%RH
9	質量	約 1kg

２．３．３　基本性能確認試験

開発した無線式振動センサーの基本的な性能を確認するため、振動検知試験、無線通信距離確認試験を実施した。

（1）振動検知確認実験

1）目的

本実験は、振動を無線式土石流検知センサーが検知できるかどうか確認することを目的として実施した。なお、振動源はハンマーによる地盤の打撃および石の落下による衝撃を採用した。

2）実験方法

実験概要を図-2-3-7、図-2-3-8 に、試験状況を写真-2-3-3、写真-2-3-4 に示す。

起振はハンマーおよび石を用い、振動源から距離を離すことにより振動が減衰することを利用し、対比用の加速度センサーの加速度と無線式土石流検知センサーの検知の有無を比較した。振動源から無線式振動センサーの距離は 5m、10m、12.5m、15m、20m、25mである。

無線式振動センサーの検知レベルは 20gal とした。距離毎に地盤を打撃し、あらかじめセンサーに取付けた加速度計が 20gal を超えた際の振動センサーの検知状況を確認した。

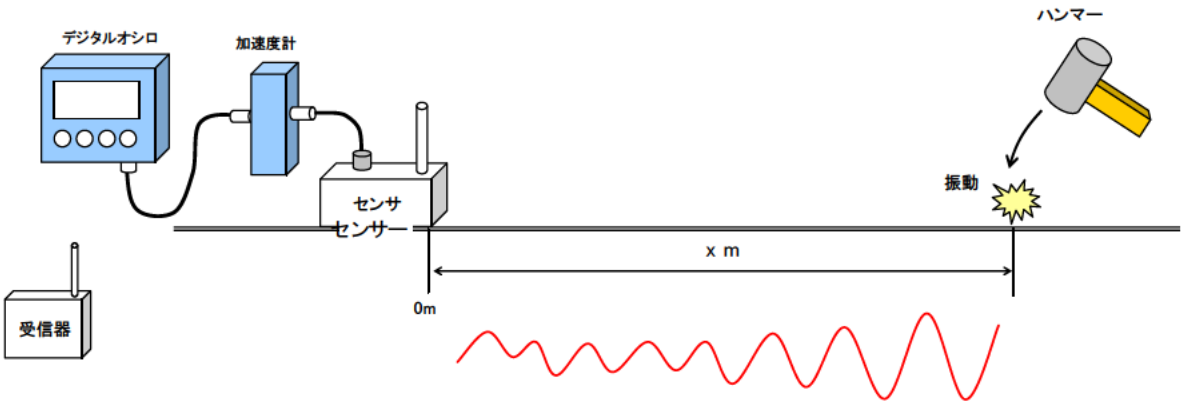


図-2-3-7　試験概要図（起振：ハンマー）

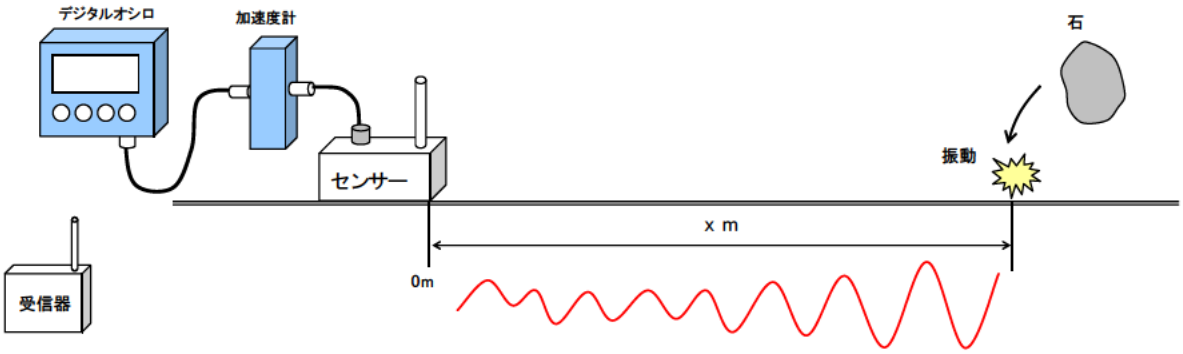


図-2-3-8　試験概要図（起振：石）

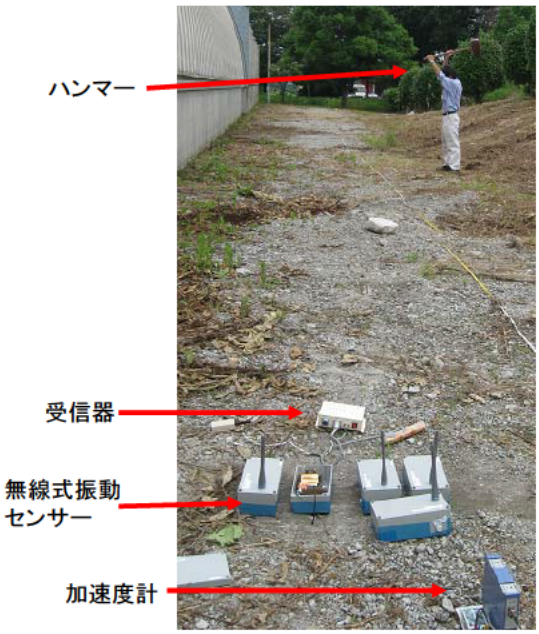


写真-2-3-3　試験状況（起振：ハンマー）

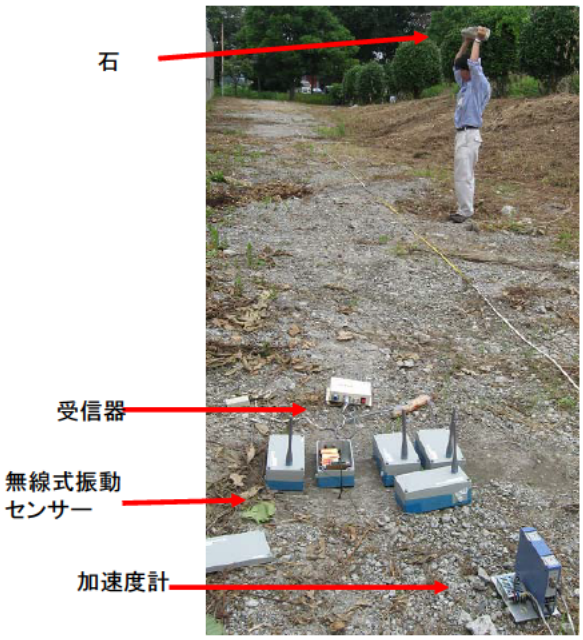


写真-2-3-4　試験状況（起振：石）

3）実験結果

実験の結果を表 2-3-8、表 2-3-9 に示す。

これらを見ると、ハンマーと石により起振させ、対比用の加速度センサーが 20gal を超えた場合（振動源からセンサー間の距離が 20m 以下）にその振動を無線式振動センサーで検知できることが確認できた。

また、図-2-3-9 に示すように対比用の加速度センサーが 20gal を超えない場合（振動源からセンサー間の距離が 25m）に無線式振動センサーが検知しないことも確認できた。

表-2-3-8　振動検知確認実験結果（起振：ハンマー）

振動源・センサー間距離（m）	検知可否
5	○
10	○
12.5	○
15	○
20	○
25	×

表-2-3-9　振動検知確認実験結果（起振：石）

振動源・センサー間距離（m）	検知可否
5	○
10	○
12.5	○
15	○
20	○
25	×

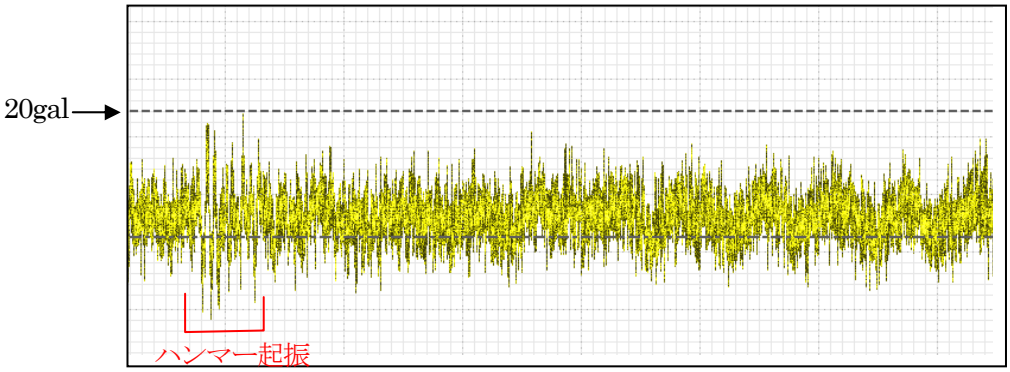


図-2-3-9　対比用の加速度センサーの波形（25m：ハンマー）

（2）無線通信距離確認試験

1）目的

無線式振動センサーの無線通信性能は、センサー配置計画を検討する上で重要な項目となる。そこで、通信可能距離を把握するために通信試験を実施した。

2）試験方法

通信試験概要を図-2-3-10 に、通信試験状況を写真-2-3-5 に示す。試験場所は独立行政法人土木研究所構内で行った。試験条件は見通しが良い道路上とした。通信試験は、センサーと受信器間の距離を 50mごとに変えながら行い、センサーからの信号の受信状況により通信可能距離を確認した。

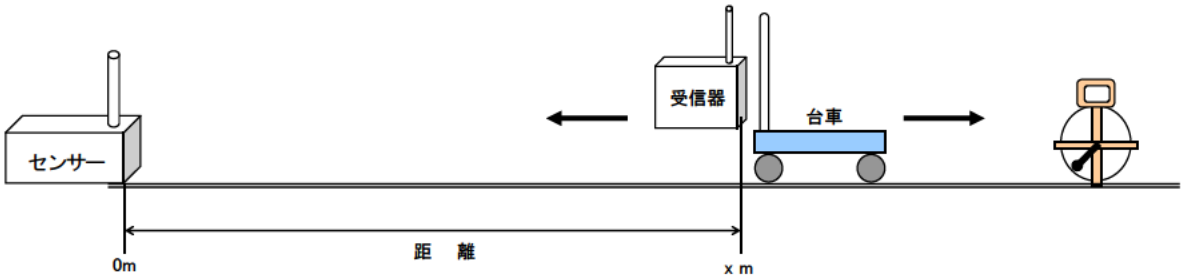


図-2-3-10　通信試験概要図

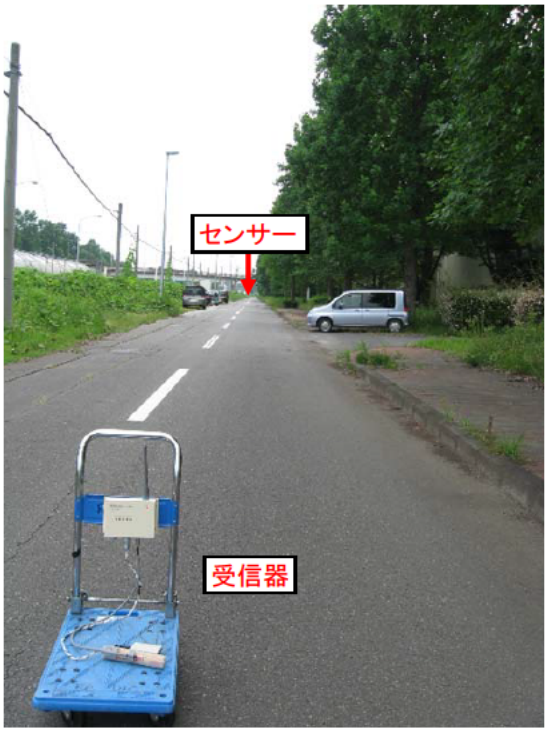


写真-2-3-5　通信試験状況

３）試験結果

通信試験の結果を表-2-3-10 に示す。センサーと受信器間の通信可能距離は 800mであった。

表-2-3-10　通信試験結果

通信距離（m）	通信可否
50	○
100	○
200	○
400	○
600	○
800	○
850	×
900	×
1000	×

２．３．４　現場検証実験

実際の現場で開発した無線式振動センサーの性能を検証するため、振動検知実験、現地観測試験を実施した。

（1）実験場所

現場位置図を図-2-3-11 に示す。実験場所を写真-2-3-6 に示す。検証試験は、鹿児島県鹿児島市桜島にある野尻川 8 号砂防堰堤右岸巻き止め護岸上で実施した。

図-2-3-11　桜島における振動センサー設置位置図

写真-2-3-6　試験場所

（2）現場振動検知実験

1）目的

桜島の野尻川８号砂防堰堤に設置した無線式振動センサーが正常動作することを確認する目的として、ハンマーを用いて起振させた振動を無線式振動センサーにより検知させる実験を実施した。

2）実験方法

実験概要図を図-2-3-12、実験場所全景を写真-2-3-7、実験状況を写真-2-3-8 に示す。

試験は、センサーから一定距離離れた地点（3m、5m、7m、9m、11m）でハンマーを用いて起振させ、その振動を検知できるかどうかを確認した。なお、実験に使用したセンサーの検知レベルは、20gal と 50gal の２種類を用いた。

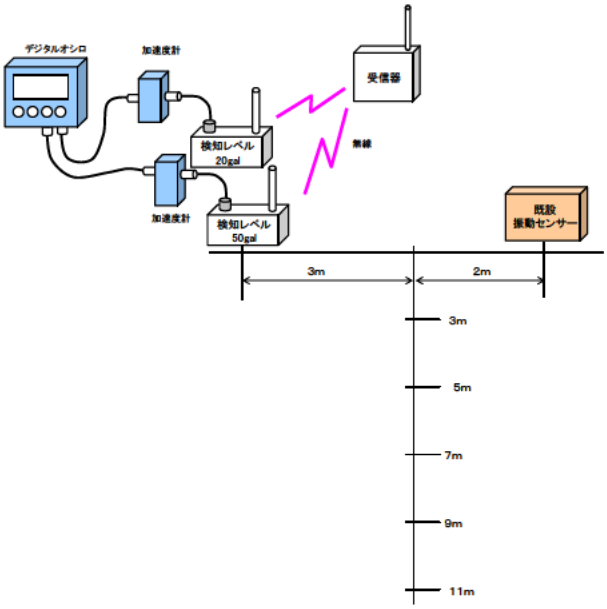


図-2-3-12　実験概要図

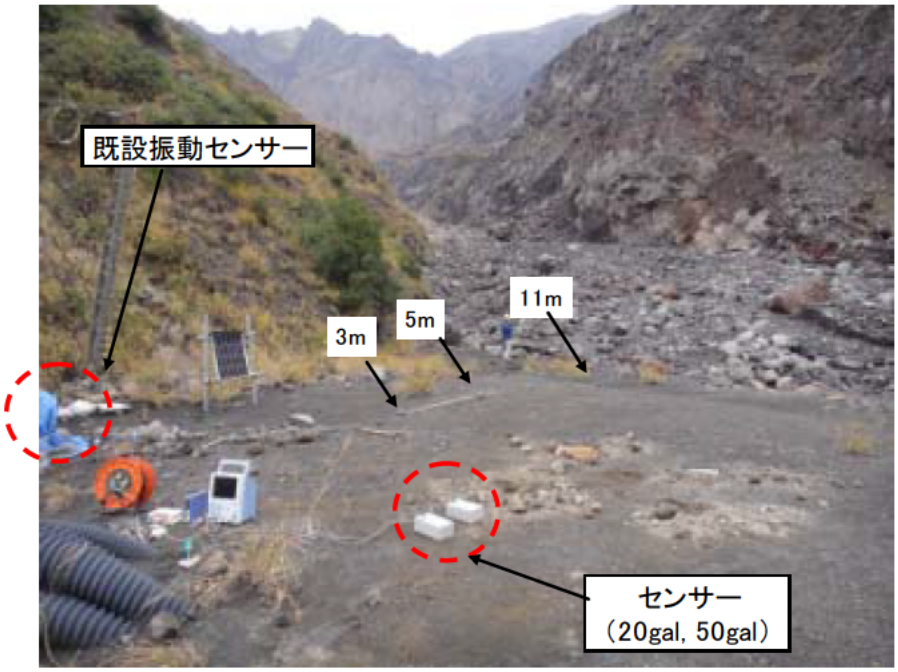


写真-2-3-7　実験場所全景

写真-2-3-8　実験状況

３）試験結果

検知レベルが 20gal、50gal のセンサーの振動検知実験結果を表-2-3-11、表-2-3-12 に示す。これらを見ると検知レベルが 20gal、50gal のセンサーは、それぞれの距離において振動を検知することが確認できた。

表-2-3-11　振動検知実験結果（検知レベル：20gal）

センサーと受信器間距離（m）	検知可否
3	○
5	○
7	○
9	○
11	○

表-2-3-12　振動検知実験結果（検知レベル：50gal）

センサーと受信器間距離（m）	検知可否
3	○
5	○
7	○
9	○
11	○

（３）現地観測

１）目的

開発した無線式振動センサーの設置方法の違いによる影響を確認するために実施した。

２）計器配置

現地観測は、平成 22 年 12 月 17 日から桜島野尻川 8 号砂防堰堤右岸巻き止め護岸上で実施した。無線式振動センサーの配置図を図-2-3-13 に示す。また、このセンサーを用いたシステムブロック図を図-2-3-14 に示す。

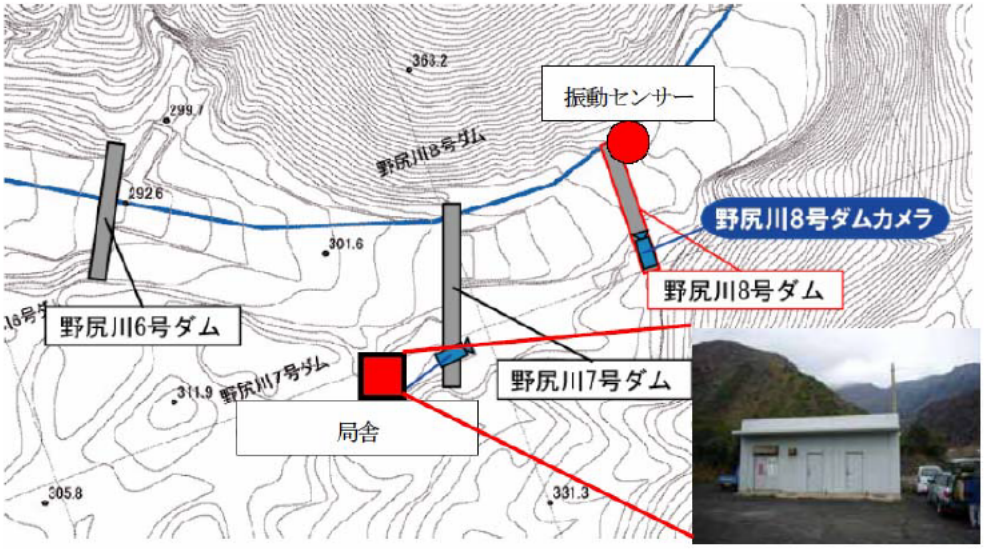


図-2-3-13　無線式振動センサー設置位置図

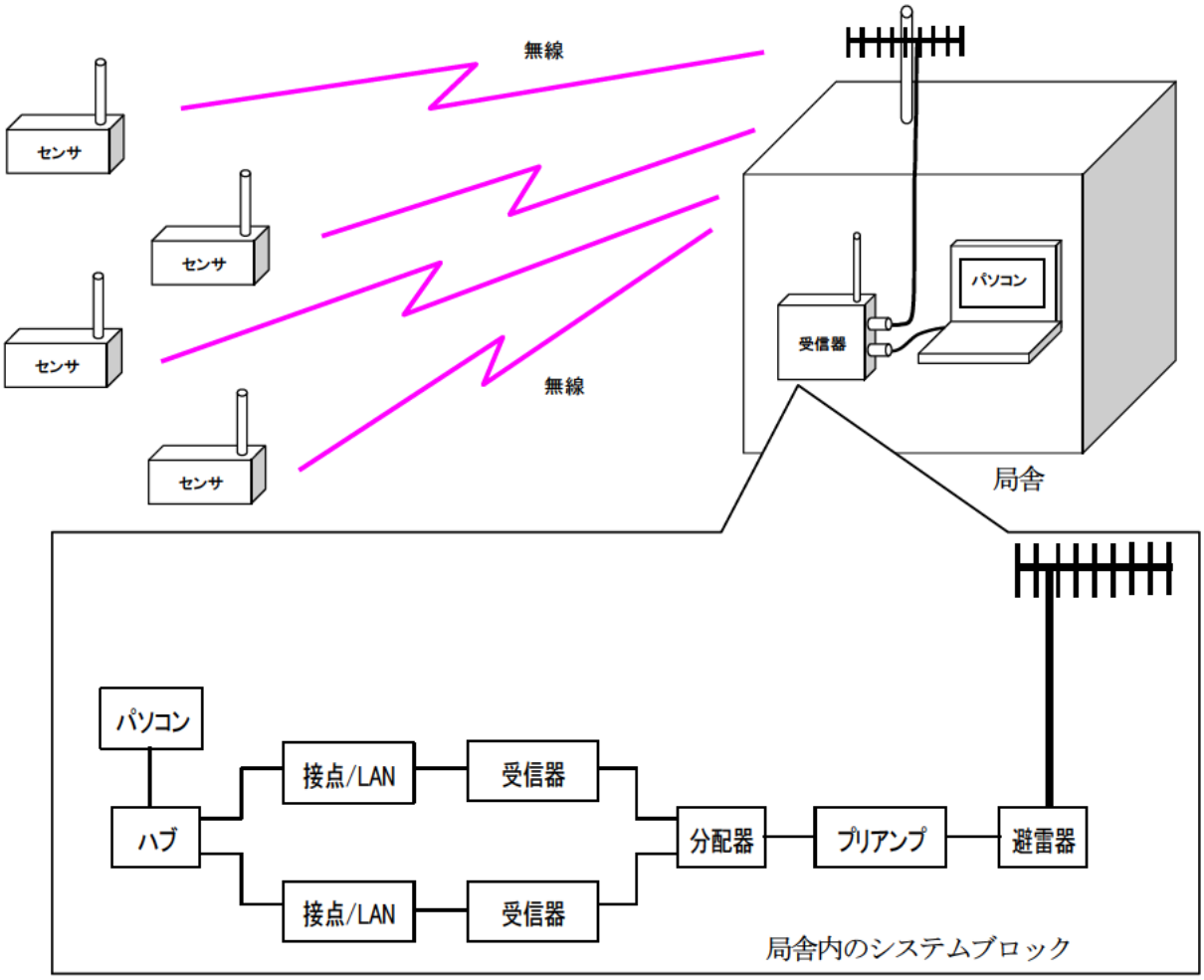


図-2-3-14　システムブロック図

3）設置方法

本実験では、開発した無線式振動センサーの設置方法の違いによる影響を確認するため、以下に示す簡単

に設置できる３パターンの設置方法と３種類の検知レベルを設定した。

①設置方法の違いによる影響の確認

設置方法の模式図を図-2-3-15～図-2-3-17、センサー設置状況写真を写真-2-3-9～写真-2-3-12 に示す。センサー設置状況全景を写真-2-3-12 に示す。設置方法は以下の３パターンとした。

(a) 単管設置型

(b) ブロック設置型

(c) 土中設置型

(a) 単管設置型

単管を土中に打込み、単管にセンサを固定設置する。

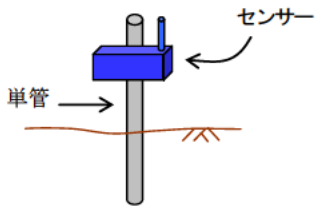


図-2-3-15 センサー設置図

(b) ブロック設置型

センサを据付けたコンクリートブロックを地表に設置する。

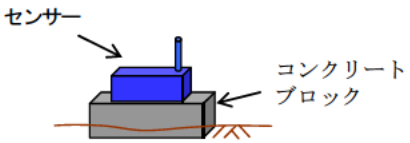


図-2-3-16 センサー設置図

(c) 土中設置型

地盤を5cm～10cm程度掘り、そこにセンサを設置し、埋め戻す。（アンテナは地表に出るようにする。）

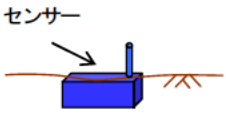


図-2-3-17 センサー設置図

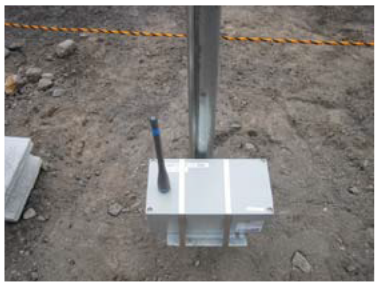


写真-2-3-9 設置状況

写真-2-3-10 設置状況

写真-2-3-11　設置状況

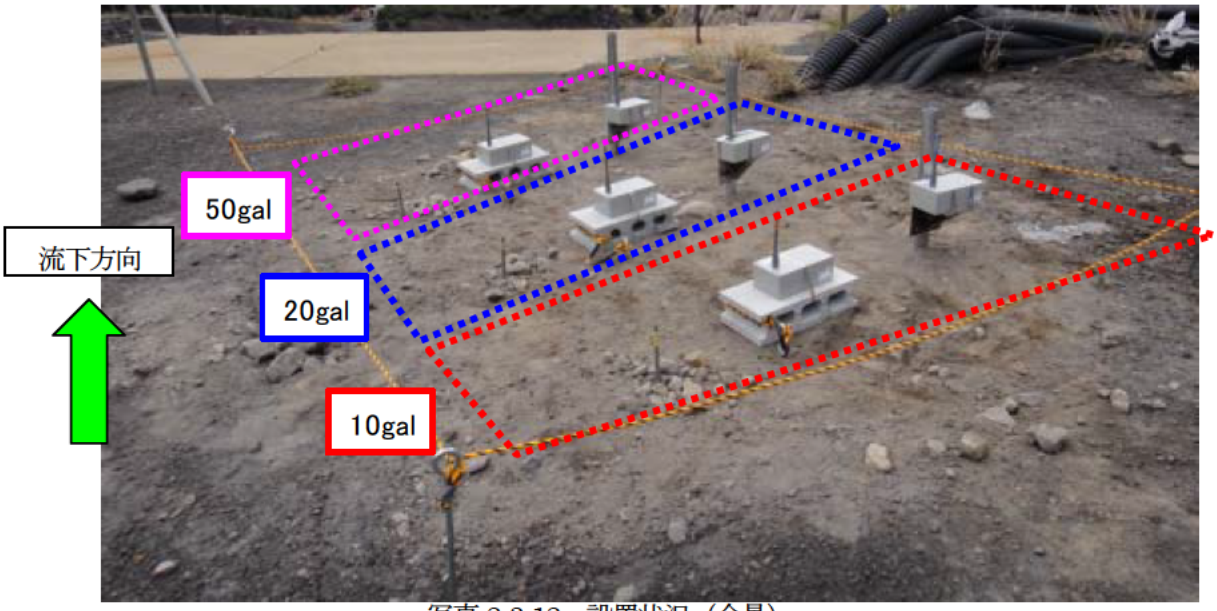


写真-2-3-12　設置状況（全景）

4）観測結果および考察

平成 23 年 4 月までに得られた無線式振動センサーの検知結果を見ると、土石流が発生していないにもかかわらず、単管設置型の 10gal が 1285 回、20gal が 498 回、50gal が 92 回の検知を記録した。これは図-2-3-18～図-2-3-20 に示すように単管設置型は風が強い日に多く検知されていることから、強風によってセンサーが揺らされ誤検知したものと推定できる。

単管設置型以外の検知結果ではブロック設置型の 10gal が 97 回検知した。これは図-2-3-21 に示すように、平成 22 年 12 月 31 日の回数が全検知回数の 1/3 を占めているが、当日は雹やあられが降っており、これがセンサー筐体に衝突した振動を誤検知したと推定できる。

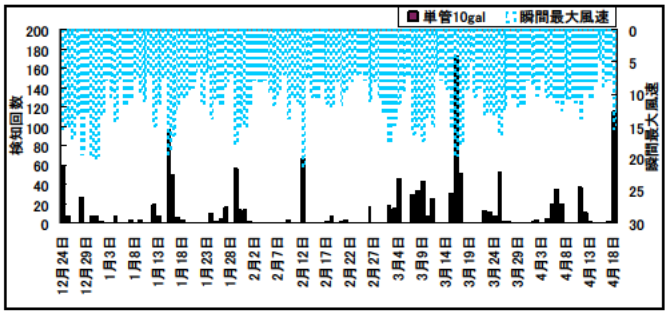


図-2-3-18　単管設置型（10gal）検知回数

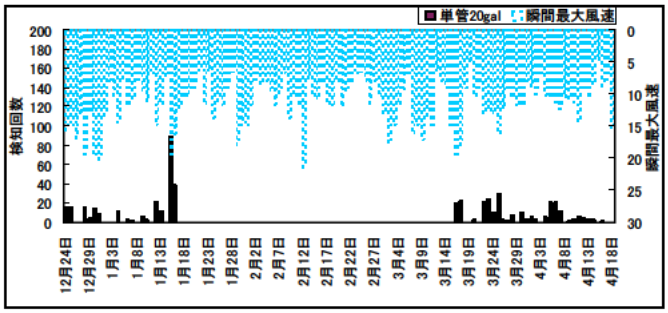


図-2-3-19 単管設置型（10gal）検知回数

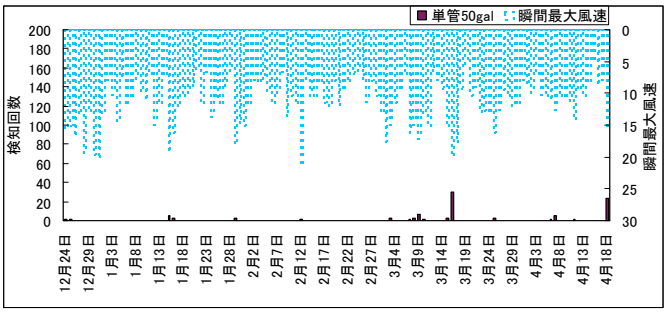


図-2-3-20 単管設置型（50gal）検知回数

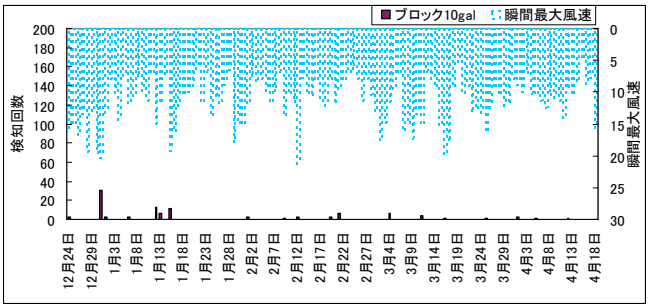


図-2-3-21 ブロック設置型（10gal）検知回数

２．３．５　今後の課題

無線式振動センサーを開発し、実用化に向けて現地実験、観測を行った。桜島における土石流検知においては、土石流発生の際の検知実績を取得できていないことから継続的に試験的な運用を実施し、土石流検知実績の取得および現場に適した設置方法・検知レベルの把握に努めたい。また、運用上の問題点の解消および更なる改良を加えて信頼性の高いセンサーにしていくことを目指したい。

３．振動センサーによる土砂流出規模推定について

１．２で述べたように、土石流の振動と土石流の規模には相関関係があると考えられている。そこで、3章では土石流の振動観測事例で得られた振動波形と土石流のハイドログラフを用いて、土石流の振動と流量の関係を明らかにするとともに、振動波形から直接土石流の規模を推定する手法について検討する。

３．１　桜島における土石流の振動と流量の関係

３．１．１　観測データの諸元

土石流の振動は鹿児島県桜島野尻川の８号えん堤（右岸の巻き止め護岸上）において観測されていた振動観測記録を活用した。観測施設周辺の状況を図-3-1-1 に示す。

図 3-1-1　振動観測施設周辺の状況

（写真は野尻川８号えん堤左岸袖部から振動センサー設置箇所を望む）

設置した振動センサーの性能は以下の通りである。

○感度 15μA／gal

○周波数特性 0.1～50Hz

○帯域内感度差 ±2%以下

○位相差 ±5 度以下

○減衰定数 30 以上

○固有振動数 5Hｚ

○ケース耐水圧 10Kg／cm^2

○感度の温度係数 5×10^{-4}／℃以内

○環境条件 周囲温度 -25℃～+70℃

○材質 SUS 製

○寸法 120φ×268Hmm（突起部は含まない）

○質量 約 5.1ｋｇ

振動計のデータは水平 2 成分、上下 1 成分の 3ch で常時記録を行っている。サンプリング周波数は 100Hz である。

３．１．２　観測データの整理について

表-3-1-1 に本研究の対象事例を示す。表-3-1-1 に示すワイヤーセンサーとは、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所が野尻川 7 号堰堤にワイヤーセンサーを 3 段（1、2、3 段の河床からの高さは 60、120、180cm）設置しており、その切断時間と切断位置を示している。数字が示されてない事例については、その事例においてワイヤーセンサーは切断されなかったことを意味しており、水位が 60cm に満たない小規模な土砂移動現象であったと考えられる。

表 3-1-1　対象事例

No.	年月日	ワイヤーセンサー		最大加速度	最大流量
		切断時間	切断位置(段)	gal	m^3/sec
1	2007/2/14	9:32	1	12.4	5.5
2	2007/4/22	20:19	2	5.4	24.7
3	2007/5/1	4:34	1	7.1	7.5
4	2007/6/22	17:26	3	26.5	42.0
5	2007/7/3			4.8	25.9
6	2007/7/9			14.8	16.9
7	2007/7/11	6:37	1	6.3	35.0
8	2008/4/9			14.5	25.0
9	2008/5/24	14:15	1	10.7	13.5
10	2008/5/28			5.0	10.0
11	2008/6/10			25.7	63.8
12	2009/5/21	?	2	63.1	75.0
13	2009/6/23	11:45	1	24.6	36.6
14	2009/9/30	18:20	1	36.7	51.0

当該箇所には、大隅河川国道事務所が監視カメラを 2 箇所設置している。表-3-1-1 の事例については、事務所からカメラの映像の提供を受け、画像判読から土石流の流量を読み取り、ハイドログラフを作成した。ハイドログラフ作成時には夜間時や気象条件の影響で土石流の流状の判読が困難となる場合があった。よって、そのような状況下で判読を実施した場合、ハイドログラフ上には“推定流量”と表記し、鮮明な映像下で判読できた場合には“判読流量“と表記した。

３．１．３　観測結果について

図 3-1-2～図-3.1.5 に振動加速度の時刻歴波形と土石流のハイドログラフを示す。

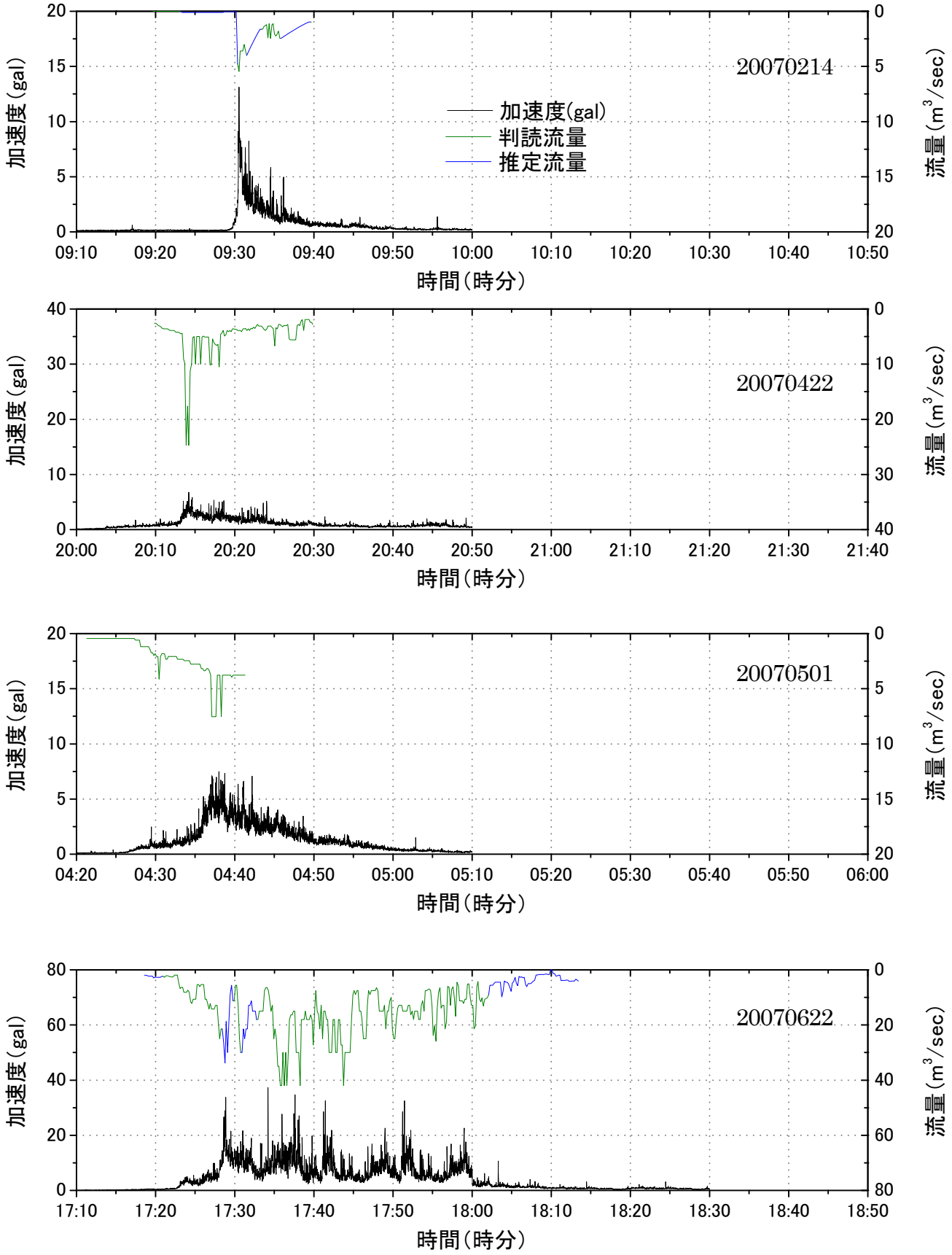


図-3-1-2　振動加速度の時刻歴波形と土石流のハイドログラフ

上から 2007/2/14、2007/4/22、2007/5/1、2007/6/22 の記録（グラフ内の数字は観測事例の年月日）

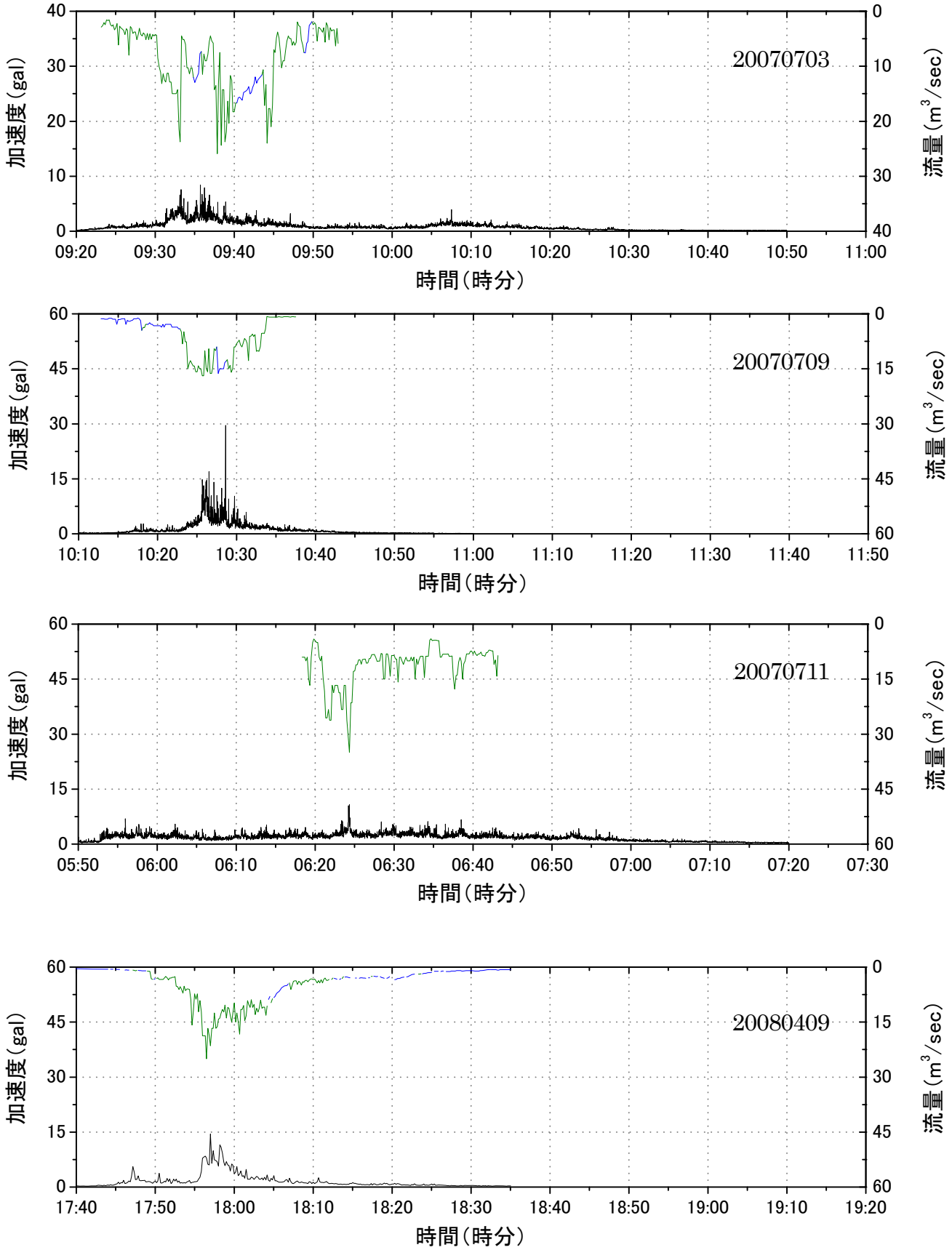


図-3-1-3　振動加速度の時刻歴波形と土石流のハイドログラフ

上から 2007/7/3、2007/7/9、2007/7/11、2008/4/9 の記録（グラフ内の数字は観測事例の年月日）

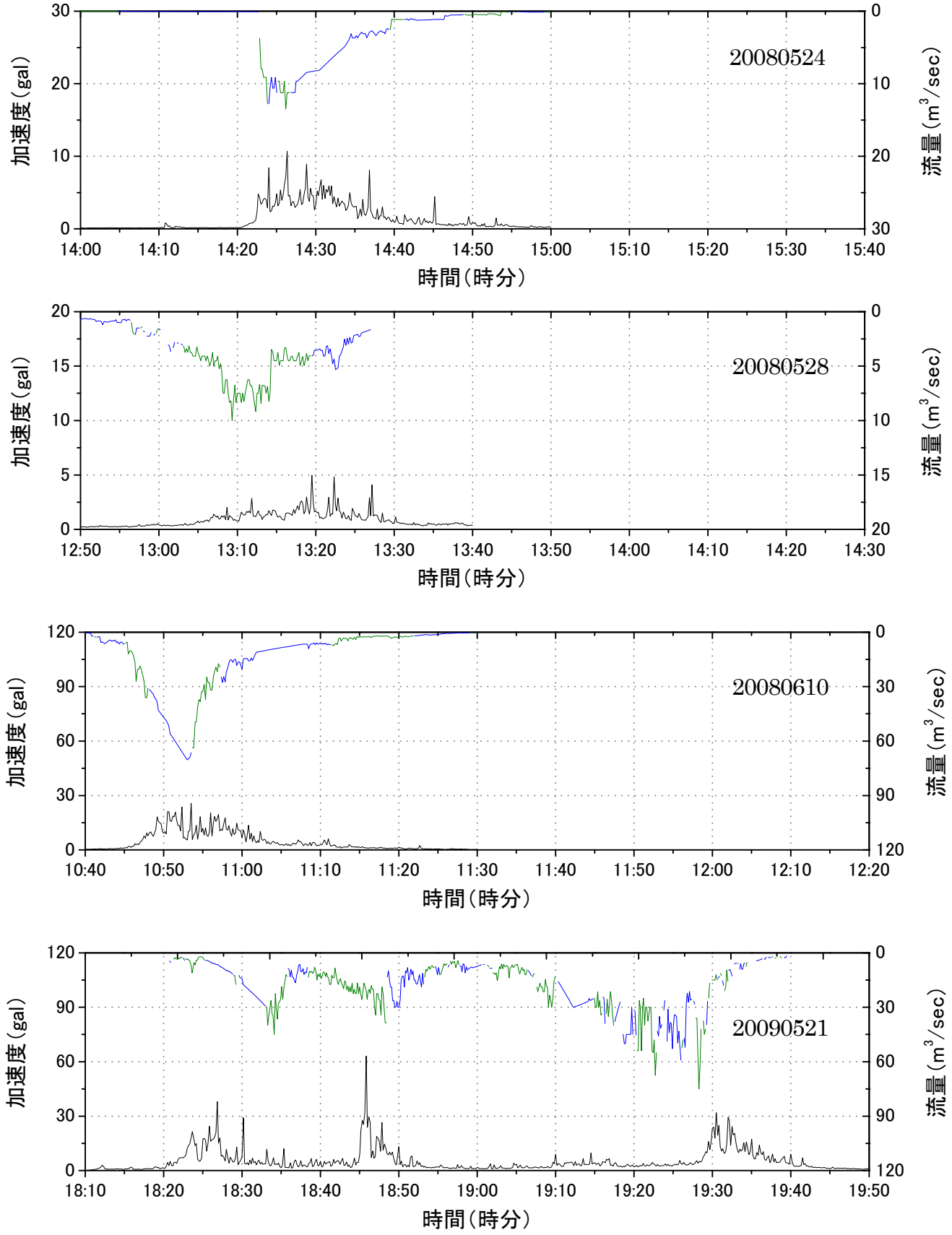


図-3-1-4　振動加速度の時刻歴波形と土石流のハイドログラフ

上から 2008/5/24、2008/5/28、2008/6/10、2009/5/21 の記録（グラフ内の数字は観測事例の年月日）

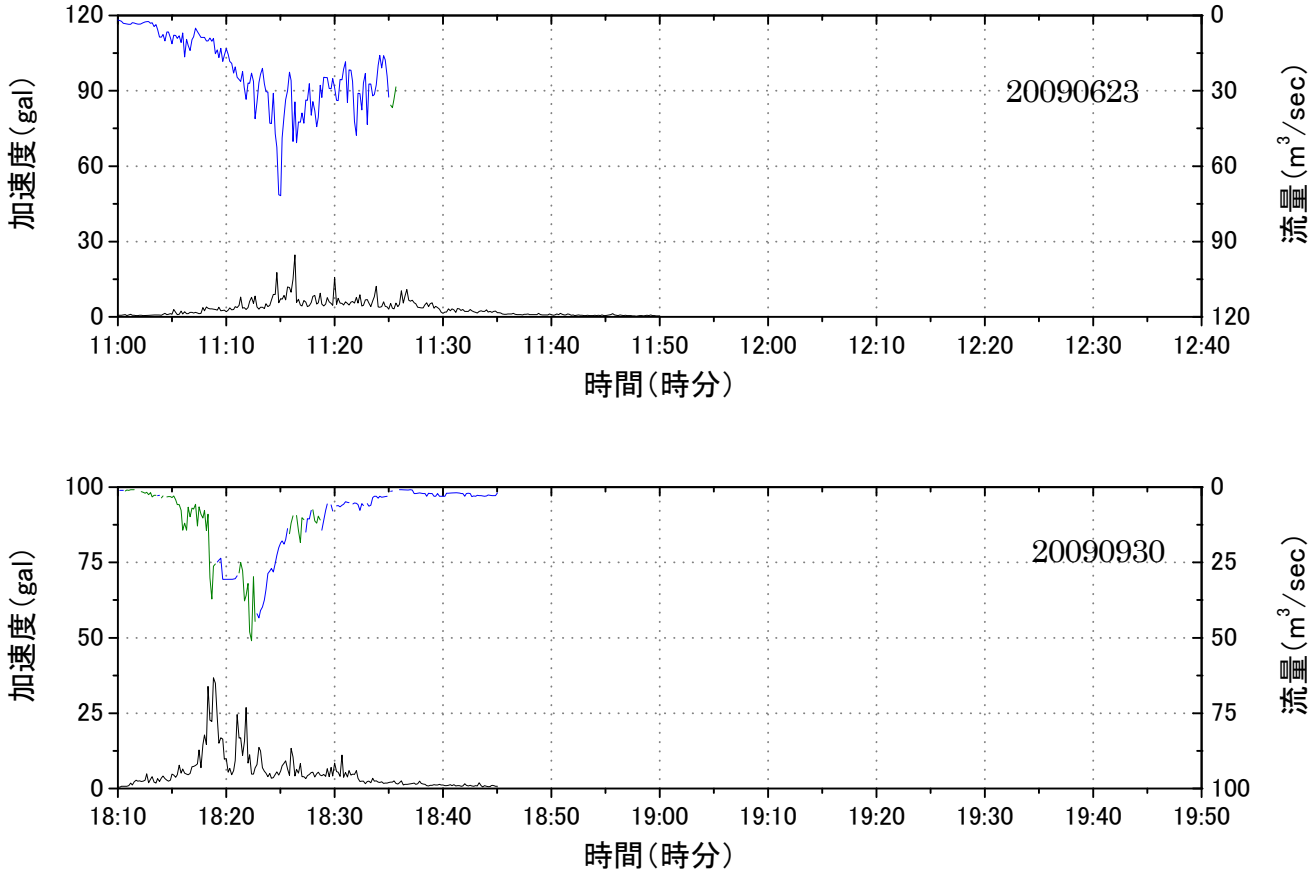


図-3-1-5　振動加速度の時刻歴波形と土石流のハイドログラフ

上から 2009/6/23、2009/9/30 の記録（グラフ内の数字は観測事例の年月日）

図-3-1-2～図-3-1-5 において、振動加速度は鉛直方向（Z 方向）の加速度の絶対値を示している。2007/2/14－2007/7/11 は 1 秒あたりの最大加速度を示しており、2008/4/9－2009/9/30 は 10 秒あたりの最大加速度を示している。土石流の振動とハイドログラフの関係をみると、流量が確認できる時間帯では加速度は大きくなることがわかる。しかし、流量と加速度の相関関係については、2007 年 2 月 14 日の事例のように、流量の増加に対して加速度が同じタイミングで増加している一方、2007 年 6 月 22 日の事例のように、流量の増加に対する加速度の増加のタイミングが一致しない事例も見られる。

図 3-1-6 は全ての観測事例における同時刻で得られた加速度と流量の関係を示す。図の横軸は“判読流量”を示している。図より、流量が増加すると振動が大きくなる傾向は見受けられるが、振動と流量について明瞭な関係性は確認できない。

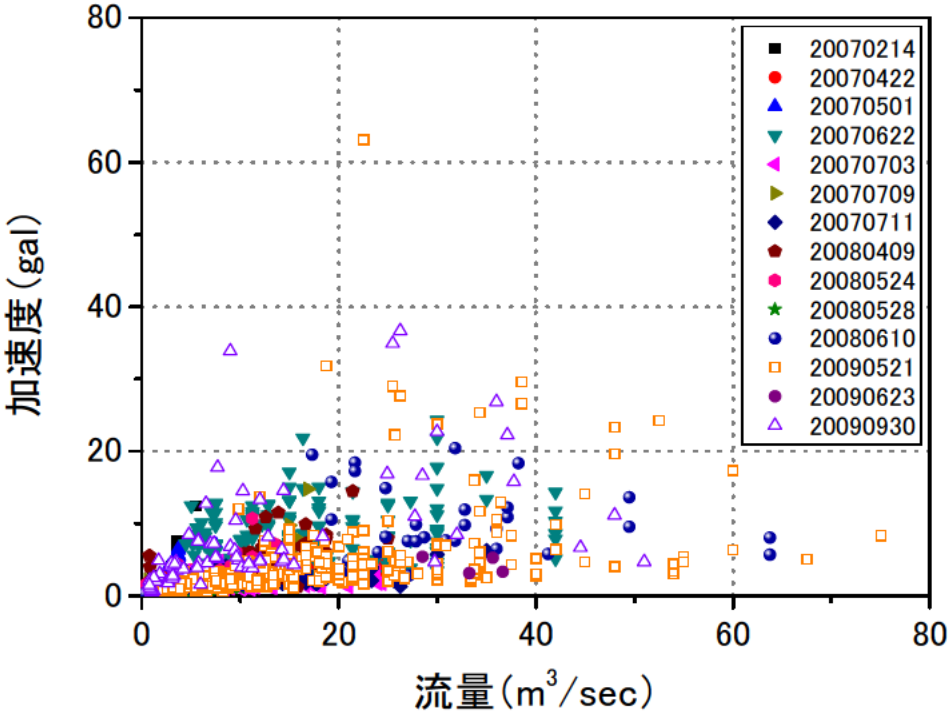


図 3-1-6　加速度と流量の関係

そこで、図 3-1-7～図-3-1-10 に、図-3-1-6 の結果を観測事例ごとに整理した結果を示す。図より、加速度と流量の関係は観測事例ごとに異なり、その傾向を、以下に示す 4 パターンに分類した。

1）加速度と流量の関係を評価できない事例（データが不足）→図 3-1-7

2009 年 6 月 23 日

2）加速度と流量に正の相関が見られない事例→図 3-1-8

2007 年 7 月 3 日、2007 年 7 月 11 日

3）加速度と流量に正の相関が見られる事例（傾向が明瞭）→図 3-1-9

2007 年 2 月 14 日、2007 年 4 月 22 日、2007 年 7 月 9 日、2008 年 4 月 9 日

4）加速度と流量に正の相関が見られる事例（傾向が不明瞭）→図 3-1-10

2007 年 5 月 1 日、2007 年 6 月 22 日、2008 年 5 月 24 日、2008 年 5 月 28 日、2008 年 6 月 10 日、2009 年 5 月 21 日、2009 年 9 月 30 日

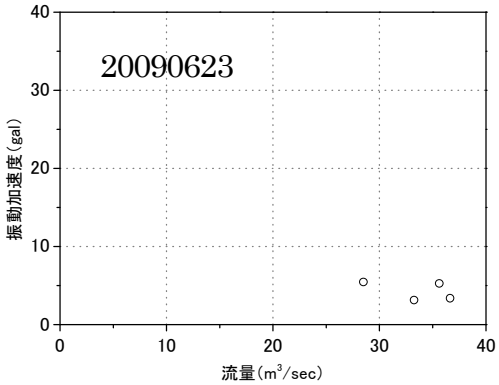


図-3-1-7　加速度と流量の関係（加速度と流量の関係を評価できない事例）

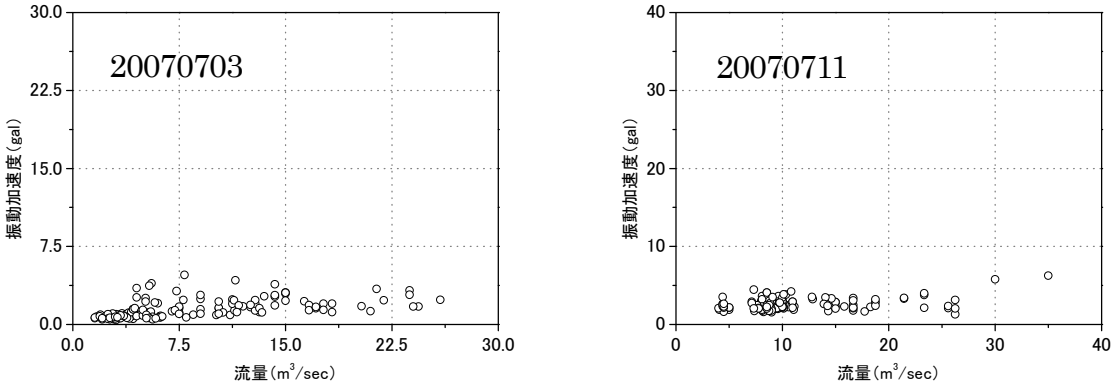


図-3-1-8　加速度と流量の関係（加速度と流量に正の相関が見られない事例）

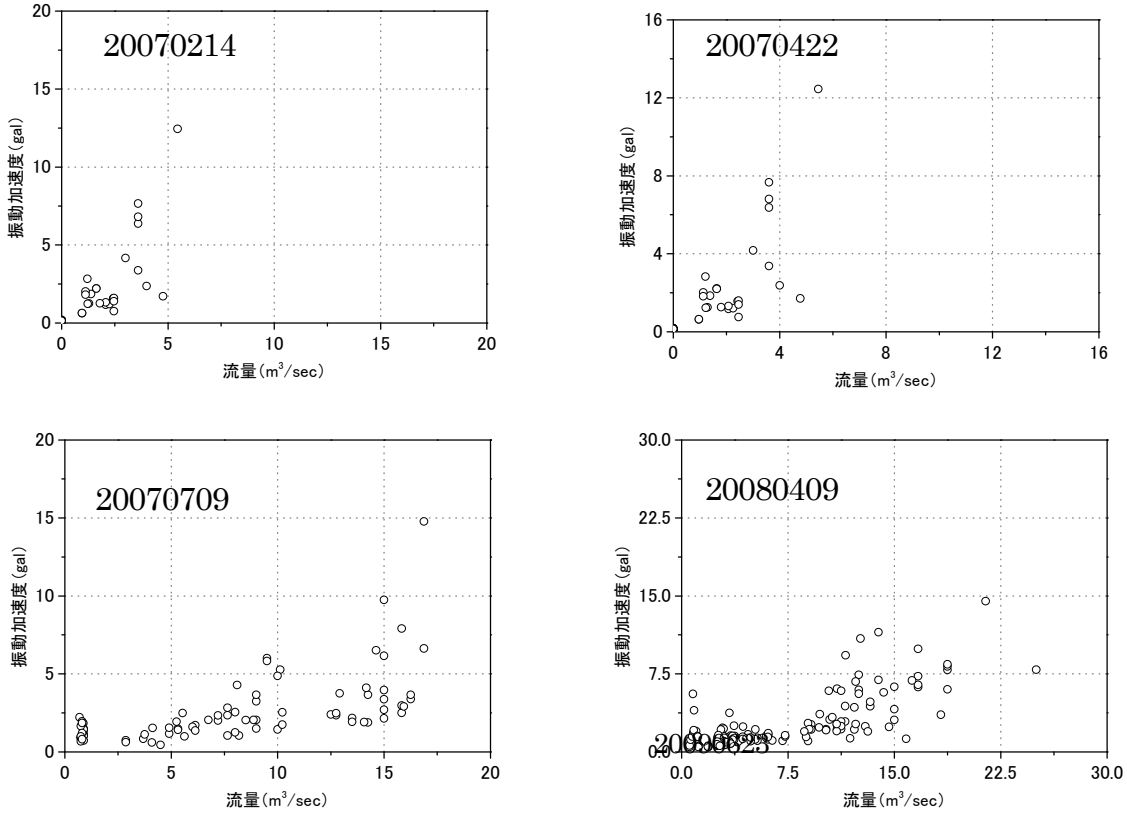


図-3-1-9　加速度と流量の関係（加速度と流量に正の相関が見られる事例（傾向が明瞭））

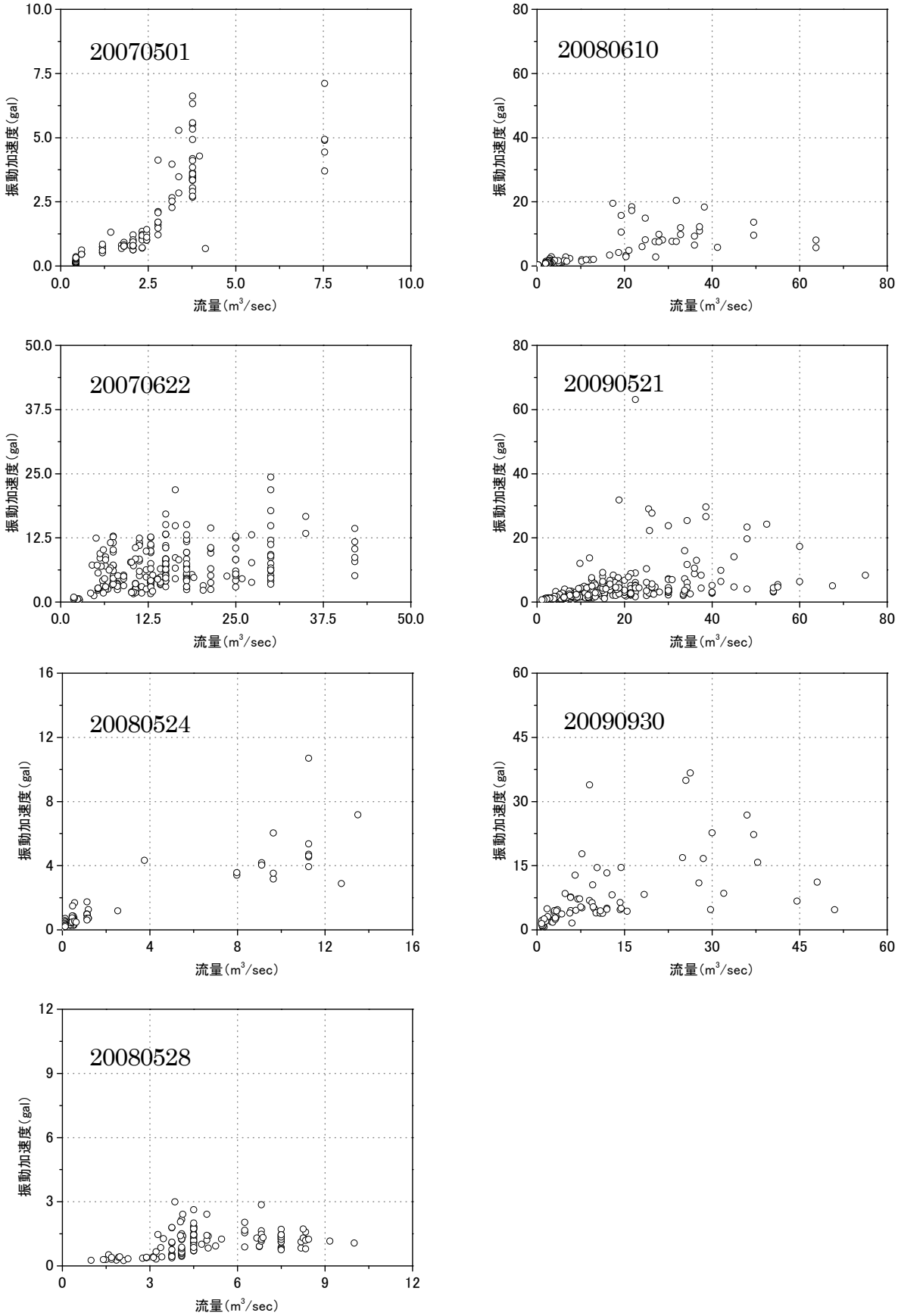


図-3-1-10　加速度と流量の関係（加速度と流量に正の相関が見られる事例（傾向が不明瞭））

ここで、4）について、図-3-1-11 より加速度と流量に正の相関が見られるものの、傾向が不明瞭な 2007 年 6 月 22 日の事例と 2009 年 9 月 30 日の事例については、各事例において、ハイドログラフからサージが流下したと思われる区間ごとに抽出して、加速度と流量を整理した結果を図-3-1-5 に示す。図より、区間ごとにグラフ内に分布する領域が異なることが分かる。これは、加速度と流量の関係を詳細に整理することで、その関係性がより明瞭になる。

なお、加速度と流量の関係が観測事例ごとに異なる原因としては、土石流の特性や流況の影響が考えられる。例えば、土石流に含まれる岩塊の数や大きさが観測事例ごと、観測事例内で確認できるサージごとに違うことに起因しているものと考えられる。また、画像を確認したところ、土石流のイベント内で流心が左右岸に振れる場合があることを確認している。これは、振動源からセンサーまでの距離が変化することになるため、振動の大きさに影響を与えるものと考えられる。

既往の研究事例において、地盤振動加速度と土石流流量の間に相関関係があることが明らかにされている[7, 17]が、土石流の振動から土石流の規模を推定するためには、単純に観測事例を収集・蓄積していくだけでなく、土石流の特性と振動の関係を詳細に分析することが重要であると考えられる。

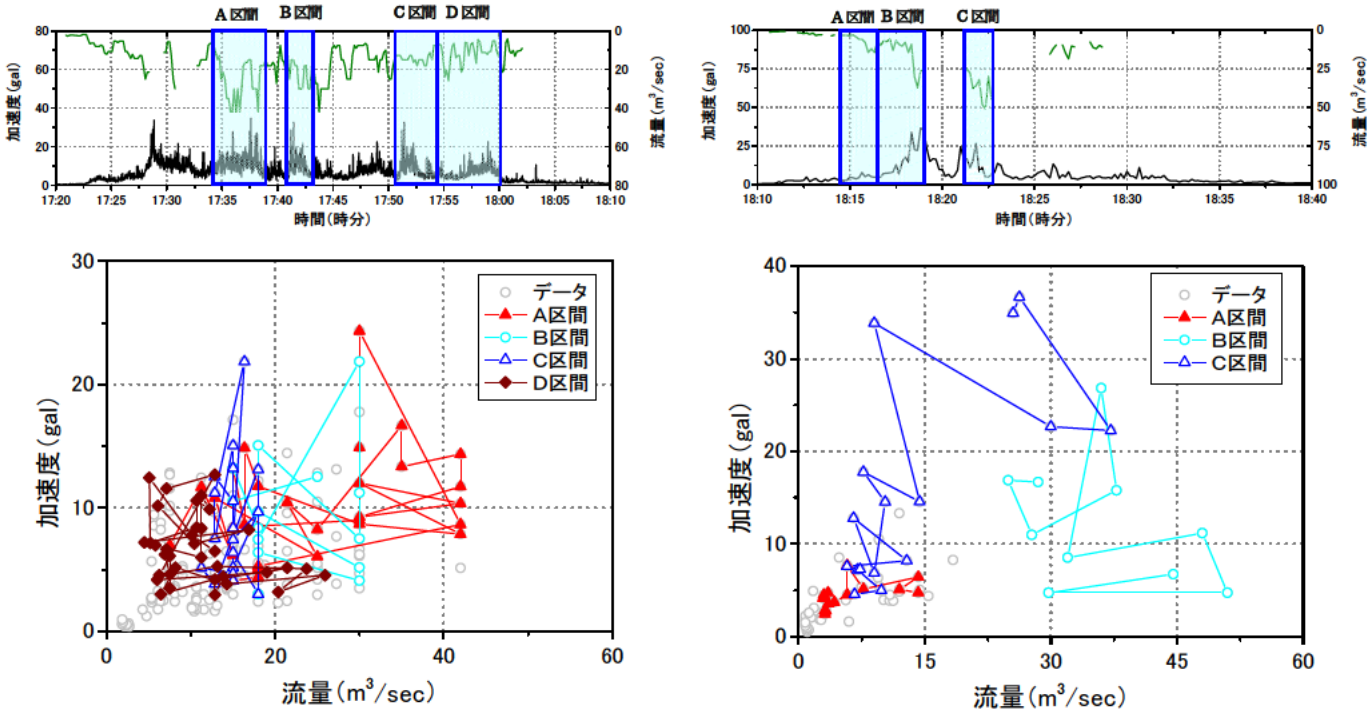


図-3-1-11　設定区間ごとの加速度と流量の関係

（左：2007 年 6 月 22 日の事例、右：2009 年 9 月 30 日の事例）

３．２　振動波形から土石流の移動速度を推定する手法について

３．１の結果より、観測事例から導いた振動加速度と流量の関係に基づいて、土石流の振動波形から規模を直接推定することは困難であることが明らかとなった。よって、土石流の振動から規模を推定するための新たな手法を提案する必要がある。

ところで、焼岳で発生した土石流の観測事例によると、土石流の振動波形は先頭部が測定点に到達する 20 秒ないし 30 秒前から徐々に増大することが確認されている[3)]。この要因として、土石流の移動速度（谷の出口で数 m/秒）と比べて，地盤振動の伝播速度が大きい（表層地盤では数百 m/秒）ために遠くで流下している土石流の振動を観測していることや、土石流が接近するにしたがって、サージと測定点の距離が短くなり振動の距離減衰が少なくなるものと考える。この考えが正しければ、土石流の移動速度が大きければ、振動の増幅は急激になり、移動速度が小さければ振動の増幅は緩やかになる。つまり、振動波形の増幅傾向から土石流の移動速度が推定できることになる。移動速度は土石流の規模を示す指標と成り得るため、これが明らかになれば、観測事例がない渓流においても、振動波形から土石流の規模の推定が可能となる。

そこで、振動波形の増幅傾向と土石流の移動速度を評価する手法を開発した。結果についてはすでに公表しているため、ここではその理論と方法について紹介する。

３．２．１　土石流の移動速度に基づいた振動波形の増幅傾向の評価手法について

本手法で対象とする土石流は石礫型土石流とする。石礫型土石流の特徴は、①先頭部は段波状を呈し盛り上がっていること②巨大な石が多く、質量が集中しているのは先頭部の通過するほんの数十秒程度であること③後続の流れは泥流状を呈し、漸次減衰すること、が示されている[20)]。１．２で述べたとおり、振動センサーに到達するまでの土石流の振動は巨礫が河床に衝突した際の振動であると考えられるため、巨礫が集中する先頭部は土石流の主な振動源と考えられる。よって、本研究では、既往の振動の距離減衰式を活用して、流下する土石流がセンサーに接近していく過程を、距離減衰式における振動源までの距離が時間的に短縮していく過程に置き換えることで、振動の増幅傾向の評価を試みるものである。このため、本研究は土石流の先頭部を点震源と仮定する。詳細を以下に示す。

公害振動の分野では振動の距離減衰は次の式（１）で評価されている[19)]。式（２）は式（１）を変形している。

$$p = p' \cdot \frac{\exp\left(-\alpha\left(d - d'\right)\right)}{\left(d/d'\right)^{n}} \qquad (1)$$

$$p = p' \cdot \left(\frac{d}{d'}\right)^{-n} \cdot \exp\left(-\alpha\left(d - d'\right)\right) \qquad (2)$$

p：距離 d 離れた位置での振動の大きさ(gal)、p'：距離 d' 離れた位置での基準振動の大きさ(gal)、α：地盤内部減衰定数、d、d'：振動源からの距離(m)、n：幾何減衰定数

式（1）、（2）は d、d' において同一の振動源の振動を観測しており、かつ基準振動の p' が得られてい

る場合に、pを推定するものである。

その概念図を図-3-2-1 に示す。図より、土石流の振動を考えると、土石流の発する振動が最も大きく観測されるのは土石流が振動センサーにもっとも接近したとき、つまり、振動センサーと河道を結ぶ線が河道と垂線になる位置（A 点と呼称する）を土石流が通過した瞬間であるため、A 点における振動を基準振動源と考える。この場合、式（2）より、振動源からの距離 d と基準点振動源からの距離 d' は等しいことになる。

一方、振動の増幅傾向は土石流の移動速度に影響されると考えられる。つまり、振動源である土石流が振動センサーに接近すると、振動は大きくなる。この現象を式で表現するために、式（2）の「d：振動源からの距離」に土石流の移動速度を反映させる。その結果、式（3）、（4）を得る。またその概念図を図-3-2-2 に示す。

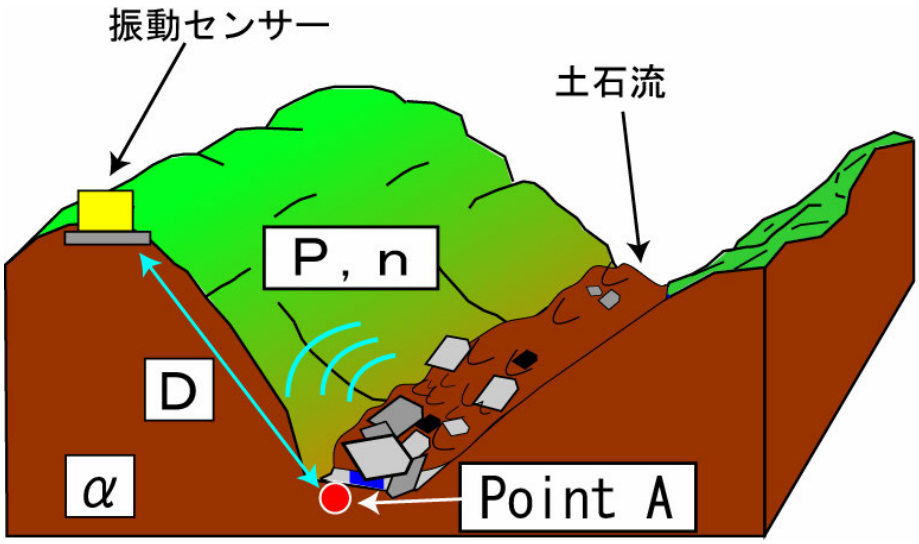


図-3-2-1　概念図（土石流が振動センサーに最も接近した場合）

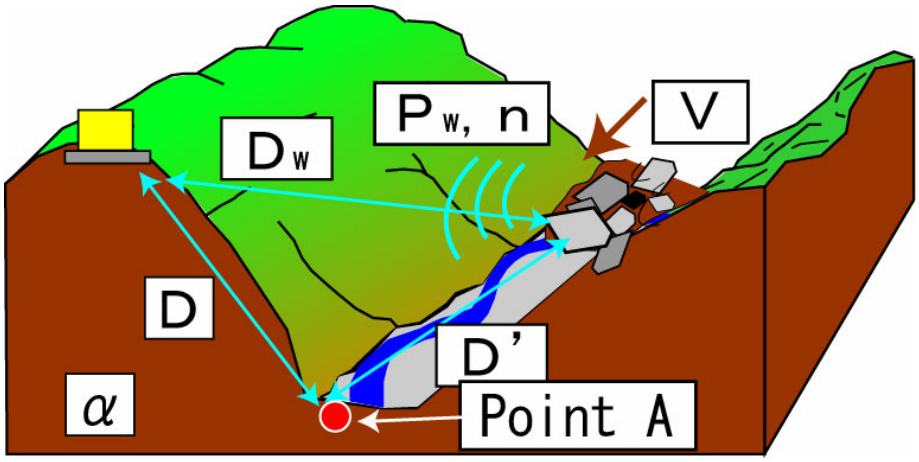


図-3-2-2　概念図（土石流が遠くにいる場合）

$$P_b(t) = P \cdot \left(\frac{D_b}{D}\right)^{-n} \cdot \exp(-\alpha(D_b - D)) \quad (3)$$

$$D_b = \sqrt{D^2 + (D' - Vt)^2} \quad (4)$$

P_b：距離 D_b 離れた位置での振動の大きさ(gal)、P：距離 D 離れた位置での振動の大きさ(gal)、D_b：土石流と振動センサーとの距離(m)、D'：土石流とA点との距離(m)、D：振動センサーとA点との距離(m)、t：時間(s)、V：土石流の移動速度(m/s)

ここで、式（4）の $D' - Vt$ は式（6）のように置き換えられる。

$$P_b(t') = P \cdot \left(\frac{D_b}{D}\right)^{-n} \cdot \exp(-\alpha(D_b - D)) \quad (5)$$

$$D_b = \sqrt{D^2 + (Vt')^2} \quad (6)$$

t'：土石流が振動センサーに最も接近するまでに要する時間（土石流が振動センサーに最も接近した時間を０とする）

この式の着目すべき点は、t' が増加することにより、P_b が減少していくことである。つまり、土石流が最も接近したときの時間を０とし、その時点から過去にさかのぼって土石流の振動の減衰過程を追跡することが出来る。それを逆にとらえれば、土石流の振動の増幅傾向を評価することができる。

本手法では式（5）、（6）を用いて土石流の振動波形の増幅傾向を評価するものである。

３．２．２　評価手法で設定すべき物性値と考慮すべき条件について

（1）地盤内部減衰定数と幾何減衰定数

式（5）で示したモデルを用いるためには、地盤内部減衰定数 α と幾何減衰定数 n を設定する必要がある。α は以下の式で表される[20]。

$$\alpha = \frac{2\pi f}{V_s}\eta \quad (7)$$

α：地盤内部減衰定数、f：振動数(Hz)、Vs：伝播速度(m/s)、η：損失係数

振動数については実際に観測された土石流の振動波形についてスペクトル解析を行って最も卓越する振動数を f とする。Vs については現場で弾性波探査や振動実験を行って評価することが望ましい。損失係数は過去の研究成果[19]を元に実際の現場に合致する値を選定することが望ましいと考えられる。

幾何減衰定数 n は、波の種類によって値が異なることが指摘されている（表面波は 0.5、実体波は 1.0）。しかし、実際の土石流の振動波形から表面波と実体波を分離することは困難であることから、両者が混在した波と想定して、0.75 を採用することが実務的であると考えられる。

（2）加速度

１．２で示したとおり、土石流の振動特性は 10Hz 以上の事例が報告されている。このような土石流を振動計で正しく計測するためには、対象の数倍～10 倍のサンプリング周波数が必要となるため、1 秒間に数 10 個～100 個のサンプリングデータとなる。

しかし、本手法は振動センサーに接近する土石流について、振動が増幅する“傾向”から移動速度を評価する手法であるため、実際の解析にあたって、振動データは単位時間あたりの代表値で評価することが合理的である。

なお、代表値としては、最大加速度がよく用いられることが多いが、最大加速度はばらつきが多く、中には加速度がパルス的に突出することが考えられる。本手法を実際の事例に適用した際、1 秒間の振動データのうち、相対度数 99%（相対度数 100%＝最大加速度）の加速度値を用いた方が、最大加速度で評価するよりも精度が良好であった。

３．２．３　適用事例

本手法は焼岳・上々堀沢で発生した土石流の振動観測記録を元に、適用可能性の検証を行った。その検証結果の一部を紹介する。具体の結果は、既往文献を参考いただきたい[21)]。

図-3-2-3 に解析結果の一例を示す。地盤内部減衰定数は 0.008 と 0.023 の 2 パターンで計算している。解析値は観測結果の振動 の増幅傾向を概ね表現していることがわかり、本手法で土石流の振動の増幅傾向を再現できる可能性が示唆される。

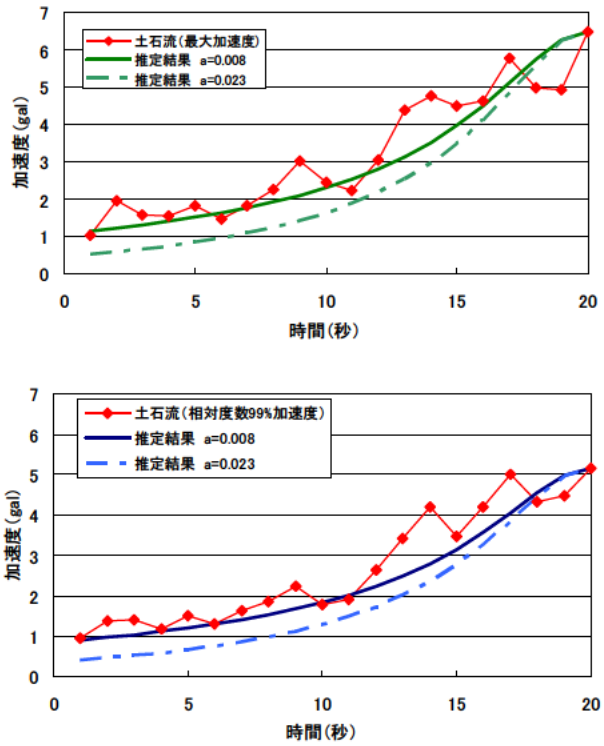


図-3-2-3　解析結果例（1988.9.12 の振動波形を対象、上：加速度振幅は最大値、下：加速度波形を相対度数 99%）

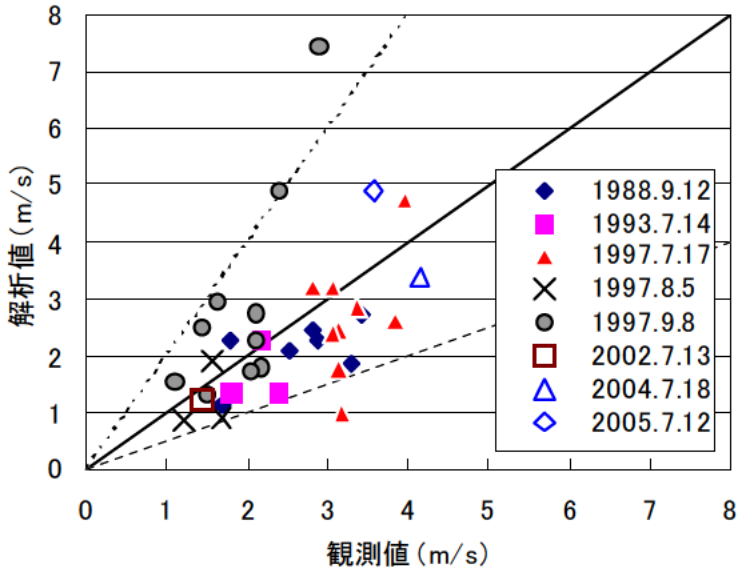


図-3-2-4　解析値と観測値の比較結果

図-3-2-4 に、実際に観測された土石流の流速（土石流の最大表面流速を 0.6 倍し、その流速で土石流が流下したと仮定）と本手法で求めた解析値との関係を示す。解析結果の一例を示す。グラフの実線は解析値と観測値が等しい、すなわち１：１である場合を示しており、破線は解析値と観測値の関係が２：1、もしくは 1：2 であることを示している。

図より、本手法で求めた移動速度について、観測値の 50～200%以内のデータは 35 事例中 32 事例（91%）であった。これより、本手法によって土石流の移動速度を概ねこのレベルで再現できることが確認できた。

３．２．４　本手法の留意点

本手法はいくつかの仮定を置くことで成立するものであるため、対象や現場条件が異なる場合、その仮定が成り立たない恐れが生じる。以下に、本手法を適用するに当たっての留意点を述べる。

本手法は土石流を点震源と仮定している。これは、いわゆる石礫型土石流のように、先頭部に質量が集中するものを想定している。また、土石流の移動速度（谷の出口で数 m/秒）と比べて，地盤振動の伝播速度が大きい（表層地盤では数百 m/秒）こと、振動の立ち上がり時間内に土石流が流下する距離が 200～300m 程度と考えられること（立ち上がり時間を 30 秒と想定して、土石流の流速を仮に 10m/秒としても流下距離は 300m）から、土石流の振動がほぼ遅滞無く振動センサーに伝わると考えられることからも適用できると考えている。

そのため、他のタイプの土石流（例えば泥流型）に対しての適用性はまだ確認されていない。また、センサーと土石流の距離が大きい場合（例えば１章で紹介した振動計と土石流までの距離が km オーダーで離れている事例等）は、土石流の振動がセンサーに到達するまでに時間差が生じることや、振動波形の伝播が地下の内部構造に強く影響を受けること等が想定されるため、点震源という仮定が成立しないと考えられる。

３．３　まとめ

本章では、土石流の振動観測事例で得られた振動波形と土石流のハイドログラフを用いて、土石流の振動と流量の関係を明らかにするとともに、振動波形から直接土石流の規模を推定する手法について検討を行った。３．１では桜島で得られた振動観測事例を用いて、土石流の流量との関係性を分析したが、明瞭な傾向は確認できなかった。その原因として、振動と流量の関係は、土石流の特性や流況に影響を受けると考えられ、それは振動観測事例ごと、観測事例の中のサージごとに異なることがわかった。よって、振動加速度から土石流の流量の関係性を導くためには、観測事例の収集・蓄積だけでなく、土石流の特性と振動の関係を詳細に分析し、明らかにする必要があると考えられる。

また、３．２では振動波形の立ち上がりを利用して、土石流の移動速度を推定する手法を提案した。移動速度は土石流の規模を示す指標と成り得るため、振動観測データから土石流の規模が直接推定できると考えられる。ただし、現在は石礫型土石流での適用事例しかないため、今後は他の形式の事例についての適用性を確認する必要があると考えられる。

４．振動センサーを活用した土石流監視手法について

本章では、２、３章において、本共同研究で検討した結果を踏まえ、従来の振動センサーとの改良点を明らかにした上で、共同研究で開発した振動センサーを活用した土石流監視手法を提案するものである。

４．１　土石流検知センサーに対する課題と本共同研究の成果

４．１．１　振動センサーの課題と本共同研究の成果

振動センサーは従来からさまざまな現場で使われてきた[22~24]一方、振動センサーの課題として、振動センサーのトリガーレベルを的確に設定する必要性が指摘されている。つまり、トリガーレベルを小さくしすぎると、小規模な土石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くしすぎると、土石流の検知ができなくなる危険性がある[1)]。

従来の振動センサーのトリガーレベルは振動の振幅値のみで設定していた。この場合、土石流以外の事象（振動・電気ノイズ等）により、振幅値がトリガーレベルを超過すると、土石流以外の現象で信号が発報されることになり、誤検知となる。この要因として、観測される土石流の振動振幅に対して、振動ノイズの振動振幅が同等以上の大きさを有することに起因する。

一方、土石流振動センサーの調査・研究が進んだことで、振動センサーで観測される地盤振動は以下のような特徴があることが指摘されている。

１）土石流の振動波形は土石流がセンサーに到達する前から徐々に大きくなり、土石流が到達した時点で最も大きくなる[2)]。

２）振動センサーの振動ノイズの継続時間は数秒程度である[11)]。

本研究では、観測した振動波形から、このような振動波形の特徴を踏まえたトリガーレベルを設定できる振動センサーを開発した。土石流検知特化型は、１）のような振動波形の立ち上がりと継続時間、現場汎用型は２）のような振動波形の継続時間を分析するアルゴリズムが搭載されている。振動波形の立ち上がりは土石流固有の特徴であること、また、観測される土石流の振動継続時間は、振動ノイズと比べて非常に長いことから、振動振幅に基づいたトリガーレベルよりも、誤検知が少なくなることが考えられる。

また、無線運用型振動センサーのトリガーレベルは振動振幅で設定するが、同センサーは複数基での運用を想定しており、例えば渓流の上下流に設置する等、土石流の流下を想定した監視体制を取り入れることで、誤検知を少なくすることができる。

４．１．２　土石流検知センサーの課題と本共同研究の成果

山田らは、今後の土石流検知センサーが満たすべき条件として、次の点が重要になると指摘している[1)]。

Ａ：気象条件に影響されず、かつ土石流以外の外力に対して破壊されにくい。

Ｂ：機器の設置、機器の調整、得られたデータの判読方法が容易であり、電気技術者でなくてもわずかの自習でそれらの技術を習得できる

Ｃ：工事や交通等の人為的な影響を受けにくい

Ｄ：発注から納入までの期間が短い。消耗品や修理のための交換部品等を迅速に調達できる

Ｅ：コストの低下

Ｆ：山間地への搬入、設置を考えると、出来るだけ小型化、軽量化する必要がある。

これらの課題について、振動センサーに当てはめると、１）振動センサーが保有する性能からすでに解決されている課題、２）本共同研究の成果によって解決された課題に大別される。

１）振動センサーが保有する性能からすでに解決されている課題

Ａについては、例えば、監視カメラによる土石流検知システムは、霧や雨等気象的ノイズや夜間による低照明度による画質の劣化が課題とされているが[25]、振動センサーはそのような気象には左右されない。また、振動センサーを地中に埋設することで、土石流以外の外力が振動センサーに作用される恐れは小さくなる。

２）本共同研究の成果によって解決された課題、

Ｂについて、機器の設置については、従来の振動センサーと同様埋設して設置することが望ましい。また、現地で行う機器の調整は、既出のマニュアルに現地起振実験としてとりまとめられている[26]。

データの判読については、現場汎用型は振動センサーのトリガーレベルを５段階設定することが可能であり、各レベルでアラームメールを送付することが可能である。これにより、アラームメールの受信時刻とアラームメールのトリガーレベルの関係を整理することで、土石流の発生時間だけでなく、概略の規模を把握することが可能となる（図-4-1）。

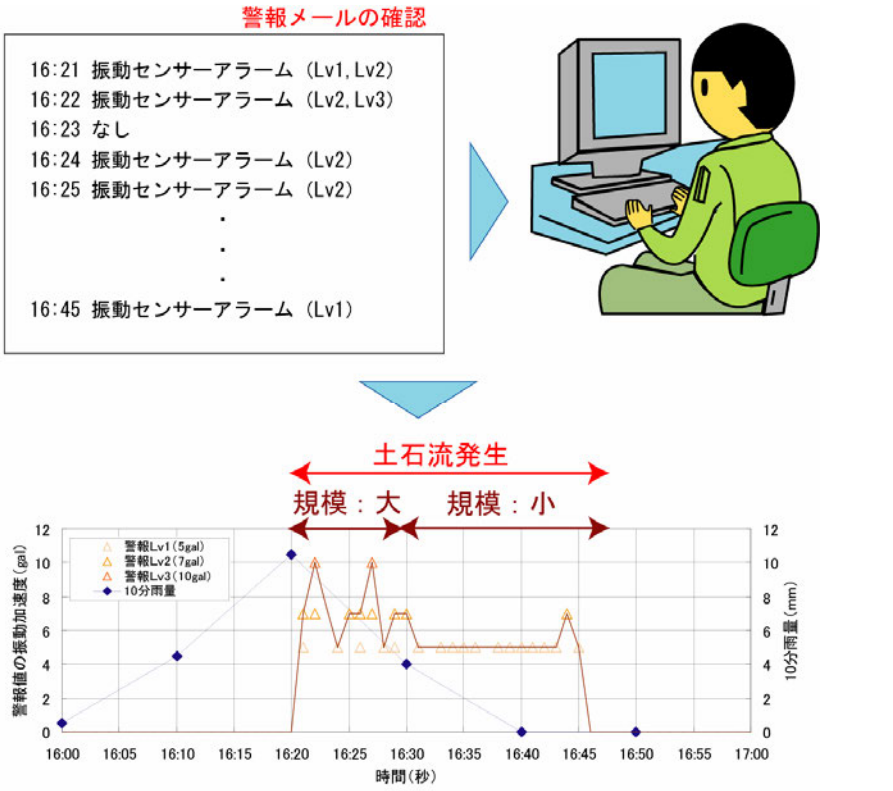


図-4-1　振動センサーのアラームメールから土石流の規模を把握するイメージ

Ｃについて、土石流検知特化型・現場汎用型は振動波形の立ち上がり・継続時間を考慮したアルゴリズムを搭載することで、振動ノイズをより低減することが可能となる。ただし、自然現象によらない人為的な振動ノイズは、施工機械のノイズ等これらのアルゴリズムでは棄却できないほどの継続時間の長い振動を発することが考えられる。その場合は設置場所を変更するなど、振動ノイズを回避することが重要である。

Ｄについて、本共同研究では振動センサーにおける部品・材料の市場状況や流通経路を主眼とした開発は行わなかったが、現場汎用型、無線運用型はセンサー部を近年技術開発や普及が著しい MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）を採用することで、センサーの部品、材料の流通が急速に衰退する可能性は低いと考えられる。

Ｅについては、ＭＥＭＳ等を活用することにより、予算の低廉化を図ることができた。

Ｆについて、振動センサー単体はそれほど大きくなく、人による運搬が可能である。また、無線運用型はセンサーの小型化・軽量化を図ったことにより、現地への運搬・設置がより容易になった。

４．２　共同研究で開発した振動センサーの活用方法

本共同研究で開発したセンサーは以下の３種類である。

○土石流検知特化型振動センサーの開発（２．１節）

○現場汎用型振動センサーの開発（２．２節）

○無線運用型振動センサーの開発（２．３節）

以下に、これらのセンサーを活用した場合のメリットを記載する。

４．２．１　検知精度の高度化によって得られるメリット

「土石流検知特化型」「現場汎用型」は、従来振動の振幅を基準としていた土石流検知手法を、振動波形の立ち上がりや継続時間から判定するアルゴリズムを搭載した。これにより、従来と比べて誤検知が大幅に解消されることで、以下のメリットが得られる。

A）誤検知による工事の中断が減少する

工事の安全管理を目的として設置されている土石流検知センサーが反応した場合、下流で工事をしている作業員はセンサーの信号に基づいて作動するサイレンやアラームメール等を元に避難行動をとるために、工事を中断しなければならない。また、検知信号発報の原因の確認のために、センサー設置箇所周辺の踏査が必要となる場合がある。その場合も工事が中断され、検知信号発報の原因が明らかになるまで、工事が再開できなくなる恐れがある。

誤検知が大幅に解消されることにより、センサーの発報によって工事が中断する恐れは少なくなる。

B）検知信号発報の原因の確認のための維持管理が低減

前述のように、検知信号が発報した場合、その原因を明らかにしなければならないためのメンテナンスが必要となる。これは誤検知が多くなるほど、その回数は増えるため、維持管理に多大な労力がかかる恐れがある。

誤検知が大幅に解消されることにより、センサーの発報によって保守・メンテナンスを行うことは少なくなることから、管理に要するコスト・労力を抑えることができる。

また、「土石流検知特化型」は無線 LAN 等を介して波形データを遠隔地からダウンロードすることができ、振動波形を確認する、３．２の手法を用いて土石流の移動速度を推定することができる。「現場汎用型」は5段階のアラームメールの着信時間を時系列に整理することで、土石流の振動波形の概略を確認することができる。

４．２．２　検知規模の把握によって得られるメリット

「土石流検知特化型」は振動センサーの波形記録を遠隔地からリアルタイムで取得することができる。「現場汎用型」は、振動センサーの閾値を5段階に区分し、それぞれ設定することができるようにした。これにより、以下のメリットが得られる。

C）検知した土石流の規模を推定することで、現象の危険性を判断できる。

１．２より、土石流のピーク流量と振動加速度に正の相関があること、振動の継続時間と土石流の継続時間は概ね同じと考えられることから、振動波形の形状（振幅、継続時間）から土石流の概略のハイドログラフを推定する可能性が考えられる。

従来の振動センサーで検知できる土石流の規模（検知対象規模）は、事前に設定するトリガーレベル（閾値）によって決定されていた。また、トリガーレベルは1段階しか設定できなかった。そのため、実際に発生する土石流に対してフレキシブルに対応することができなかった。つまり、従来の振動センサーでは検知対象規模以下の土石流を検知することは不可能であり、また、逆に想定以上の規模の土石流が流下した場合、土石流が保全対象等に到達する前にその危険性の程度を判断することも不可能であった。

振動波形記録をダウンロードすることや、振動センサーの閾値のレベルを確認することで、発生した土石流の概略の規模を把握することができる。これにより、現場で発生した土石流の危険性をリアルタイムで判断することが可能となった。

D）噴火活動が活発化した火山における防災対策の基礎情報を取得できる

火山噴火に伴って火山灰や火砕流が堆積した流域では、噴火後の降雨により土石流や泥流が頻発するようになる。さらに、1991 年の雲仙普賢岳噴火は、噴火活動が終息するのに 4 年を要しており、土石流の頻発期間が長期化することがある。その場合、土石流の規模の推移を把握することは、噴火後の土砂災害対策の基礎的な情報になる。

例えば、住民への避難勧告の発令や解除を判断するためには、その時点における土石流発生の危険性を把握する必要がある。噴火直後ならば、危険性の判断に対する理解は得やすいと考えられるが、噴火から一定の期間が経過した場合は、危険性の判断に対する理解を得るために、土砂移動現象の実態に関する情報が非常に有効となると考えられる。

一方、従来使われてきた土石流検知センサー（振動センサー含む）は、土石流の検知情報（発生情報）のみを取得する仕組みになっており、検知した土石流の規模の取得を主目的として設置されてはいなかった。

ワイヤーセンサーについては、ワイヤーを河道横断方向に上下段設置することで概ねの検知規模も取得できるが、火山活動の活発化により、センサー設置箇所が立入禁止区域に設定され、ワイヤーの張り替えやメンテナンスが出来なくなる恐れがあるため、火山噴火時におけるワイヤーセンサーの運用は困難である。

振動センサーならば､そのような問題は生じないため､火山噴火時においても継続的な運用が可能である。また、「土石流検知特化型」「現場汎用型」は前述のとおり、概略の土石流の規模が把握できるため、データを蓄積することで、センサー設置地域の土砂移動現象の実態を把握することが出来る。

４．２．３　センサーの複数運用によって得られるメリット

「無線運用型」は、他の２種と異なり、高度な土石流検知のためのアルゴリズムは搭載していないが、センサーとしての原理を単純化して、複数機を同時に運用することを可能とした。これにより、以下のメリットが得られる。

E）１地域において複数個所の監視が必要となる場合

２．３．１で述べたように、支渓が複数存在する流域において、面的に土砂移動現象の監視を行いたい場合に有効である。

F）渓流の上下流における監視

４．１で述べたように、渓流の上下流に設置することで、検知信号の時間差から土石流の発生を判断することができる。また、検知信号の時間差とセンサーの距離から、土石流の移動速度が分かるため、土砂移動現象の実態を分析するための情報を得ることができる。

４．３　まとめ

本章では、土石流検知センサーで指摘されていた課題に対する本共同研究の成果を明らかにすると共に、目的に応じた各振動センサーの活用方法を提案した。本共同研究で開発した振動センサーを現場のニーズや状況に合わせて臨機応変に活用することで、土砂災害の監視体制や警戒避難体制の構築がより合理的になるものと考えられる。

謝辞

本共同研究において、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所には、振動センサー試作器の検証実験に関する現地ヤードの提供や、３章で分析した土石流の画像データの提供等、多大なるご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

また、２章２．１の振動センサーの検知手法の精度検証にあたり、(独) 防災科学技術研究所の基盤強震観測網 KiK-net で観測された地震観測波形を使用いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1）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、No.5、p.60-64、1998.

2）諏訪 浩、山越 隆雄、佐藤 一幸：地盤振動計測に伴う土石流の規模推定、砂防学会誌、Vol.52、No.2、p.5-13、1999.

3）加茂 幸介：桜島に発生する土石流による土地振動の特性、文部省科学研究費昭和 51 年度特別研究「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」、p.119-120、1977.

4）諏訪 浩、清水 洋：雲仙に発生した土石流と火砕流による地盤振動の特性、平成 3 年度科学研究費補助金・突発災害研究・研究成果報告書、p.40-51、1992.

5）森脇 寛：崩壊型土石流の流下に伴う地盤の震動特性－小谷村蒲原沢土石流－地すべり、Vol.36、No.3、p.99-107、1999.

6）奥田 節夫、諏訪 浩、奥西 一夫、横山 康二、小川 恒一、浜名 秀治：土石流の総合的観測その 5　1978 年焼岳上々堀沢における観測、京都大学防災研究所年報 22B-1、p.157-204、1978.

7）石田 哲也、浅井 健一、浅野 広樹、渡 正昭、小泉 市朗、井上 公夫：富士山大沢川で発生した土石流の地盤振動特性、平成 15 年度砂防学会研究発表会概要集 p.172-173、2003.

8）大角 恒雄、浅原 裕、下川 悦郎：野尻川における振動センサーを用いた土石流検知自動判定システムに関する一考察、砂防学会誌、Vol.61、No.1、p.3-10、2008.

9）武澤 永純、山越 隆雄、田中 秀基、笹原 克夫：振動検知式土石流センサーの検知基準値の設定方法について、土木技術資料、Vol.47、No.4、p.32-37、2005.

10）黒田 英偉、稲葉 千秋、佐々木 寿、小川 達則、能和 幸範、大野 善典：非接触型センサーのトリガーレベル設定について(第 3 報)、平成 18 年砂防学会研究発表会概要集、392-393、2006.

11）武澤 永純、柳町 年輝、栗原 淳一、寺田 秀樹、西本 利彦、小原 正人：三重県西之貝戸川における振動検知式土石流センサーの検知基準設定手法に関する一考察、平成 18 年砂防学会研究発表会概要集、394-395、2006.

12）M. Arattano: Monitoring the presence of the debris-flow front and its velocity through ground vibration detectors, Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment,

Rickenmann & Chen (eds.), Millpress, pp. 719 – 730, 2003
13）大角 恒雄、長山 孝彦、槇納 智裕：振動センサーによる土石流・地震・ノイズ識別検知に関する一考察、砂防学会誌、Vol.59、No.3、p.38-43、2006.
14）独立行政法人土木研究所、有限会社秋山調査設計、坂田電機株式会社、株式会社拓和、中央開発株式会社、日本工営株式会社：土砂災害の警戒避難支援のための斜面崩壊検知センサの開発共同研究報告書、独立行政法人土木研究所共同研究報告書第 419 号、2011.
15）国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所 HP 内、桜島の防災情報、最近の土石流発生状況
http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/sabo/jyouhou/pdf/doseki_jyoukyou.pdf
16）山田 孝、南 哲行、水野 秀明：総合的な土石流検知手法の構築、土木技術資料、Vol.41、No.6、p.20-23、1999.
17）森島成昭：立派な仕事をされた人・業務ー優良業務編ー、月刊メディア砂防、Vol.26、No.11、p.6-9、2010.
18）奥田 節夫、諏訪 浩、奥西 一夫、仲野 公章、横山康二：土石流の総合的観測その３　1976 年焼岳上々堀沢，京都大学防災研究所年報 20B-1，237-263、1977.
19）子安 勝：騒音・振動（上），コロナ社，ｐ.204、1978.
20）塩田 正純：公害振動の予測手法，株式会社井上書院，p.198-209、1986.
21）武澤永純、神野忠広、柳町年輝、山越隆雄、田村圭司：地盤振動を活用した土石流の移動速度推定手法の提案、土木技術資料、Vol.51、No.9、p.10-15、2009.
22）石川芳治、石塚忠範、山田孝：地盤振動計を用いた土石流検知システムの開発、土木技術資料、Vol.38、No.6、1996.
23）石原彰宏：現場代理人稼業　自然災害から現場を守りたい、月刊メディア砂防、Vol.25、No.2、p.24-25、2008.
24）老野裕介：金山沢渓岸工工事における安全対策について、月刊メディア砂防、Vol.27、No.5、p.12-15、2010.
25）小川達則、佐々木寿、能和幸範、青山裕：非接触センサの連続観測による土砂動態モニタリングの可能性、砂防学会誌、Vol.61、No.6、p.27-30、2009.
26）独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：振動検知式土石流センサー設置マニュアル（案）、土木研究所資料 3974 号、2005

共同研究報告書

Cooperative Research Report of　PWRI

No.445 October 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課

〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754