

## 寒冷地特性を考慮した火山泥流監視システムの開発に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 25～平 29

担当チーム：寒地河川チーム

上席研究員（特命事項担当）

研究担当者：藤浪 武史、矢部 浩規

船木 淳悟、伊藤 丹

前田 俊一、伊波 友生

阿部 孝章、竹ヶ原一郎

田中 忠彦、佐々木泰則

### 【要旨】

火山泥流被害の最小限化のためには、早期に発生を検知することが重要である。これに関して、検知機器としてワイヤセンサが現在多く利用されている。一方、土砂移動が生起する振動を検知する方法は、土石流検知の実績がある。また、振動検知は複数回の土砂移動現象を検知可能と考えられている。さらに、近年半導体技術の発達により、小型で安価な振動センサや画像による熱検知センサも普及してきている。本研究は、MEMS 技術を用いた小型で安価な振動センサ等を利用した火山泥流の監視システムの開発に向け、熱検知、振動検知および通信試験を行った。その結果、実用の可能性があることがわかった。

キーワード：火山泥流、振動検知、MEMS 3 軸振動センサ、監視システム

### 1. はじめに

積雪期の火山噴火は融雪型火山泥流を引き起こす場合があり、1926 年 5 月の十勝岳噴火では、大正泥流と呼ばれる融雪型火山泥流により 144 名の命が奪われた(写真-1)。泥流災害の特徴は、高速移動すること、流動性が高く遠方まで到達するため被災範囲が広いこと、さらに流木移動を伴うとさらに甚大な被害が発生すること等である<sup>1)</sup>。したがって、下流市街の住民や、噴火活動に備えた緊急的な防災工事等の安全確保のため、泥流発生 of 早期検知が重要である。

これまで、土石流など土砂移動の検知には、接触型のワイヤセンサが多用されてきている(写真-2)。土砂移動によるワイヤ切断によって泥流の発生と見なすことが、検知原理上わかりやすく確実である。しかし、積雪寒冷地では積雪沈降力によるワイヤの切断など維持管理に特に苦慮している。また、ワイヤセンサは一度切断されると再接続の手間が生じるため、噴火活動が活発化し立入りが規制されるとそれ以降の検知再開が困難となる。さらに、ワイヤセンサは、支柱基礎、支柱およびワイヤ等で構成され、老朽化した施設の更新に当たり費用面の負担の重さが考えられる。

一方、近年では MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 等の半導体技術の発展により、安価かつ小型

なセンサの活用が急速に拡大してきている。これに応じ構造工学や地震工学分野においては、建設構造物の健全性把握を目的として、小型センサによる振動のモニタリングが試みられている<sup>2), 3)</sup>。こうした考え方を土砂移動の検知に応用することができれば、従前よりも安価で高密度に土砂移動のモニタリングができる可能性がある。しかし、実現象の検知を想定した取り組みは一部存在する<sup>4)</sup>ものの、依然として少ないのが現状である。さらに、非接触型の振動検知は複数回の土砂移動の検知が可能と考えられる。しかし、土石流の振動検知実績は豊富にある<sup>5)</sup>が、泥流の振動検知実績は見当たらない。したがって泥流を振動検知できるかは不明である。

一方、ワイヤセンサによる泥流等の検知は、獣などによる接触や電氣的ノイズ等による誤作動が生じることもあり、二重設置等により誤検知除去の対策が考慮されている。現場との意見交換では、手間の面でも費用の面でも維持管理の簡素化、入山規制時にも何らかの情報の継続的入手および誤検知しないこと等が求められている。

本研究は火山泥流監視において、安価で小型の振動センサを用いた、火口近くの観測(図-1に赤点線で示す範囲)を主とする利用の実用可能性を検証すること



写真-1 十勝岳の融雪型火山泥流 1926年5月24日  
気象庁ホームページから引用



写真-2 積雪期(12月中旬)のワイヤセンサ

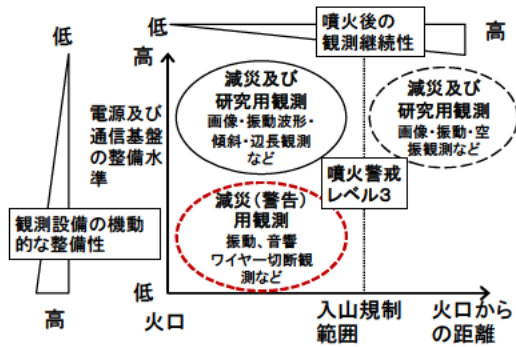


図-1 火山噴火に関する観測内容の模式

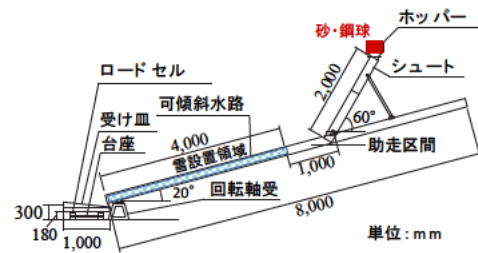


図-2 泥流発生実験水路の模式

が目的である。

## 2. 研究方法

研究の内容を以下に示す。火山災害は頻度としては高くないため、融雪型火山泥流の発生検知の適用性を検証するため、主に実験的なアプローチに依った。なお、研究方法や研究結果等の詳細については後に掲げる既報<sup>6)~14)</sup>を参照願いたい。

まず、噴火活動の一つである火砕流から泥流への移行過程の関係を求めることを目的に、実験を行った<sup>6),7)</sup>。

次に、大正泥流では火口から約20 kmの地点でも生暖かかったという被災者の証言<sup>1)</sup>がある。そのため、近年、市販品として入手が容易となった超小型サーモグラフィカメラ(以下、「サーモカメラ」という。)を活用した熱画像監視が、室内実験により熱や土砂の移動が検知可能か検討を行った<sup>8)</sup>。

三番目に、積雪層が介在する場合に、泥流等の検知時に積雪層が及ぼす影響を明らかにするため、振動がどの程度減衰するかを目的として実験を行った<sup>9)</sup>。さらに、泥流を振動検知式の小型センサで検知できるか実験を行った<sup>10)</sup>。

四番目に、計測・データ処理・通信の3要素それぞれ

の信頼性が現地観測ひいては防災・減災に重要なため、無線によるデータ通信実験<sup>11),12),13)</sup>や長距離通信<sup>14)</sup>等の実用性を実験により確認した。

### 2.1 火砕流から泥流への移行過程に関する実験

図-2に示すような幅20 cm、高さ20 cmの水路を用い、シュートから高温砂または高温鋼球を落下させ積雪層上でこれらを流動させた。水路下流端で落下重量を測定できるよう受皿とロードセルを設置した。流路内には熱電対を設置しておき温度上昇時刻より落下距離と落下時間の関係を求められるようにした。実験は斜面条件を新雪またはざらめ雪、砂または鋼球の重量を4.8, 12 kg、それらの温度を室温(約8度)、500度、700度とし実施した。新雪は降雪を用い、ざらめ雪は荒目網でかき砕いたものを使用した。砂は比重2.66、平均粒径0.34 mmの珪砂を用い、鋼球は比重7.7、平均粒径1.23 mmのものを用いた。水路内に設置した熱電対の温度上昇時刻より落下距離と落下時間の関係を求め、これより落下速度を推定した。各実験ケースにおいて水路各部での熱収支から雪斜面の融雪に寄与した分の熱量を簡易的に推定し、雪面条件から初期積雪量を融解するのに必要な熱量との比較を実施した。



写真-3(a) サーマカメラモジュール



写真-3(b) 小型PCボードの接続状況



写真-3(c) 小型実験水路

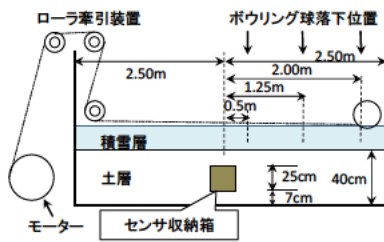


図-3 積雪層の振動減衰用実験水路の模式



写真-4(a) 振動検知センサの設置状況



写真-4(b) ボウリング球落下試験の状況

## 2.2 画像による熱検知技術を用いた融雪型火山泥流検知の実験

画像による熱検知としてサーモカメラ（小型長波長赤外線カメラコアFLIR Lepton、写真-3(a))を採用し、その制御のために小型PCボード（Raspberry Pi Model B+）を使用した（写真-3(b)）。サーモカメラモジュールは小型PCボードのGPIO（General Purpose Input/Output）ピンに接続した。小型PCボードの制御には標準のOSを用い、サーモカメラから自動で熱画像を取得し、計測範囲における熱源の発生や移動を把握できる仕組みとした。本検討ではこの小型PCボード大のサーモカメラ（以下、「試作サーモカメラ」という。）を用いて、実験室において試験を行い、その適用性や課題について検討を行った。また、今回構築した試作サーモカメラの比較用として、市販のサーモカメラ（FLIR ONE、以下「市販サーモカメラ」という。）を併設し、熱画像計測結果の比較を行うこととした。

熱検知距離試験として、直径25 cmの円形水槽に60度の温水を入れ、サーモカメラとの水平距離 $L$ を変化させて、どの程度の距離を熱源として検知できるか確認した。次に熱を伴う土砂移動を検知するため、写真-3(c)に示した水路長1 m、幅7 cm、勾配 $\theta_0 = 20^\circ$ でポ

ンプ給水が可能な小型実験水路を用い、(1)砂礫床3 cmと、(2)砂礫床3 cmの上に積雪層2 cmを設置の、2通りの実験条件を設定した。砂礫床の平均粒径は概ね3 mmである。ここに30度の温水を $q_{in} = 20 \text{ L/min}$ で給水し、模擬的な土石流ないし融雪泥流を発生させ、これをサーモカメラで撮影し、流下時の高温部の移動や時系列的なフロント位置の変化などを検討した。

## 2.3 振動センサを用いた融雪型火山泥流検知の実験

### 2.3.1 積雪層の振動減衰の実験

実験装置は、長さ5.0 m、幅1.0 m、高さ1.2 mの木製水路とし、鋼製単管で水路外部を補強し剛性を高め、実験施設の床に対し水平に設置した。また、床面からの振動遮断を目的に水路足場と床面との間に厚さ5 mmの硬質ゴムを設置した。水路には厚さ40 cmの土層を配置し、その中に7 cmの土層の上に外形高25 cmのセンサー収納箱を埋設した（図-3、写真-4(a)）。

土層は、締固めが容易な焼却灰と珪砂(主に4号)を約1:2の割合で混合した。土質試験の結果、通過質量百分率50%粒径である $D_{50}$ は0.289 mm、均等係数は2.0、土粒子の密度は $2.687 \text{ g/cm}^3$ であった。積雪厚 $h_s$ は0 cm、15 cm、20 cm、30 cmおよび40 cmの5段階に設定し実験を行った。





写真-5 泥流検知用の実験水路

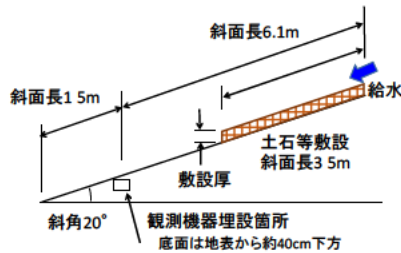


図-4(a) 泥流検知用実験水路の模式

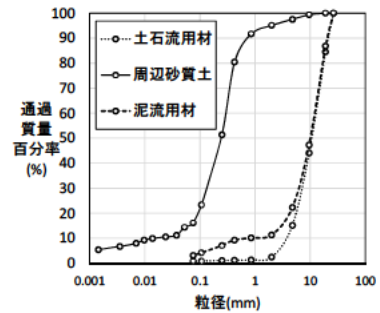


図-4(b) 流下材料の粒径分布

計測センサは、主に地震観測で使用されている 2Hz 3 成分速度型地震計 (CDJ-S2C-2、以下、「速度型地震計」という。) を使用した。サンプリング周波数は 1,000Hz に設定した。

起振方法は既往研究を参考に、積雪層による振動減衰の検討を目的としたボウリング球落下<sup>15)</sup>による方法により行った。ボウリング球 (約 5.1 kg) 落下によるスパイク性振動として落下高 (土層表面からボウリング球最下点間の距離) 0.5 m と 1.0 m の 2 種を実施した (写真-4(b))。なお、ボウリング球落下地点は、センサ収納箱と水路末端との中間地点である  $L = 1.25$  m を主体とし、 $L = 0.5$  m と  $L = 2.0$  m のケースは積雪厚 2 種類 (0 cm および 20 cm) で行った。

### 2. 3. 2 泥流流下による振動検知の実験

振動による泥流検知の実験は、縮尺規模を概ね 1/10 と設定し、砂質土で構成された斜面に水路を設置して実施した。水路自体の振動抑制のため地山斜面に水路を設置したもので、水路の諸元は勾配 20°、幅 0.5 m、斜面長 7.6 m である。寒冷期の計測システム稼働に着目して、実験時期は 2018 年 3 月上旬に北海道石狩市に位置する寒地土木研究所石狩水理実験場 (以下、「石狩水理実験場」という。) において気温 -2.0 度 ~+1.3 度の環境下で実施した。本研究では振動検知に 2 種類のセンサを使用した。一つは省電力で長期計測を意図し静電容量型 MEMS 3 軸加速度センサ(KXR94-2050)を主要構成部品とするセンサユニットを試作し (以下、「試作センサ」という)、サンプリング周波数 2 Hz に設定した。二つ目は計測精度の高さから試作センサとの対比および振動波形取得を意図し、速度型地震計をサンプリング周波数 500 Hz に設定したセンサである。実験では、斜面上半分の 3.5 m に泥流材等を敷設し、毎秒 5.4 L の一定量の水を供給し泥流等を発生させた (写真-5、図-4(a))。

一方、泥流と土石流の違いは、予備実験により、フ

ロント部の流動深が後続部よりも大きいかな否かで判断した。また、土石流用の材料は、購入砂利をそのまま使用し、泥流用の材料は周辺の砂質土と購入砂利とを容積比 1 : 3 に混合して使用した (図-4(b))。泥流用材の粒径加積曲線は、1926 年十勝岳噴火による大正泥流堆積物と類似している<sup>1)</sup>。さらに、振動センサは流下斜面下部に地中埋設した。加えて、斜面土質への水の浸透を防ぎ、流下斜面の表面条件を一定にするため、#3000 規格のブルーシートを敷設した。その実験水路の流下状況を正面と側方の 2 方向から撮影した。

泥流や土石流の規模把握の確認ができるか、泥流流下を想定した敷設厚 3 種 (5, 7.5, 10 cm) の泥流用材、土石流流下を想定した敷設厚 2 種 (5, 10 cm) の土石流用材の流下 5 ケースにより振動検知実験を実施した。併せて得られた計測値にフーリエ解析を行い、固有の周波数の有無や特徴を確認した。

### 2. 4 振動データの通信実験

#### 2. 4. 1 観測データの通信実験

実験は、石狩水理実験場において、気温 4 度、雪温 -1.5 度、降雪はなく見通し良好な環境下で行った。振動検知および通信試験の概要を図-5、写真-6~8 に示す。実験に使用したシステムは、振動検知および送信部並びに受信部に大別される。振動検知には試作センサを使用し、センサを制御する汎用小型マイコンボードは、Arduino UNO R3 互換機を使用した。通信には送受信とも Zigbee モジュール(XBee ZB S2)を使用した。この通信モジュールは、データレート 250 Kbps、周波数帯域 2.4 GHz、そして、屋外見通しでの通信距離は公称値で最大 120 m である。Zigbee 通信は、免許が不要な出力規模と周波数帯を使用するもので、情報量の制約があるが通信網の早期構築が可能である。これら振動検知部および送信部の製作費は 1 セット当たり約 1 万円と比較的安価である。なお、通信負荷の軽減の観点から、3 軸のうち水平方向の 1 軸を間隔 0.2 秒

で通信実験をすることとした。水平方向を選定した理由は、起振源からの振動伝達方向に着目したためである。

1) 振動検知試験では、締固め用機械の1.8kW級ランマ(以下、「ランマ」という。)を除雪した地表でフル運転させて起振し、検知距離と振動検知との関係を確認した(写真-6)。振動源から検知部までの距離は5m、10m、15m、20mとし無線通信距離1mをとった。

2) データ通信試験では、検知および送信部の設置位置を雪面上とし、センサ設置板を指でたたき起振した。無線通信距離を60m、130m、150m、200mとし、通信の確実さと距離との関係を確認した(写真-7)。送信受信の箇所数は1:1の関係である。

3) 通信試験ではさらに、積雪によるアンテナ埋没の影響を想定し、検知および送信部を深さ50cmに雪中埋設(写真-8)した。掘出した雪は締固めずに埋戻した。埋戻し箇所から1m離れた雪面にベニヤ板を敷き、人が飛跳ねて起振した場合は無線通信距離を10m、20mに、ハンマー(1.3kg)打撃で起振した場合は、30m、50mに設定した。送信受信の箇所数は1:1の関係である。

#### 2. 4. 2 多点の観測データを1地点で受信するネットワーク実験

1) 前項と同様の計測機器において、泥石流等の流下を模擬して振動源を移動させて起振した。一つのセンサ埋設地点から1m離して、センサ埋設方向と平行に前

後10mずつランマを概ね毎秒0.2mの速度で移動させ、5地点で振動検知を行った(図-6, 写真-9)。5地点の観測データを1地点で同時に円滑に受信できるかを実験した。これをSt-1前からSt-5前までの5地点で行った。通信データは鉛直方向の1軸の計測値とし、通信間隔は1.0秒である。

2) 通信距離を40m、送信数と受信数を1:1に固定し、通信間隔を変化させ通信の確実性に着目して実験した。通信間隔は0.1秒から0.5秒まで0.1秒おきに变化させた。通信データは鉛直方向の1軸の計測値である。

#### 2. 4. 3 火山山麓における観測データの長距離通信実験

前項の計測機器環境から、無線モジュールをXBee ZB(S2C)モジュール(周波数帯域2.4GHz、屋外見通しでの通信距離は公称値で最大1,200m)に代えて実験を行った。通信データは鉛直軸の計測値で、通信間隔1.0秒、送信受信の箇所数は1:1の関係である。屋外試験は図-7に示すように、北海道美瑛町白金に位置する白金流路工周辺および火山砂防情報センターに無線式簡易振動センサおよび受信機を設置した。流路工内のSt.1(受信機からの距離405m)、St.2(610m)、St.3(805m)に無線式簡易振動センサを設置しており流路工から情報センターにかけての縦断面図は図-8に示す通りである。St.1,2についてはランマにより1分間の起振と1分間の小休止を交互に行う間欠的な起

振動検知・通信試験の概要

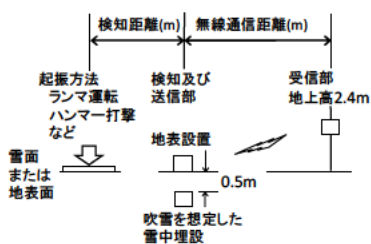


図-5 振動検知および通信試験の模式



写真-6 ランマ起震の状況

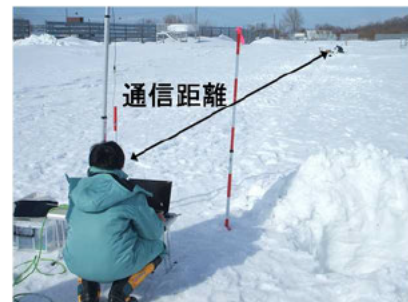


写真-7 通信試験の状況



写真-8 送信部の雪中埋設状況

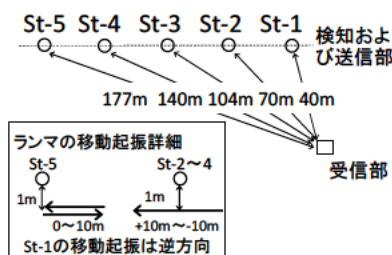


図-6 検知及び送信部と受信部とのネットワーク形態



写真-9 通信ネットワーク状況





図-7 十勝岳白金流路工付近の実験箇所図

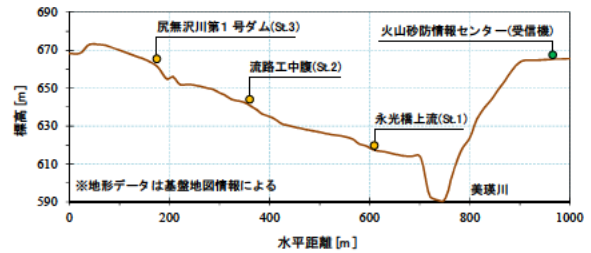


図-8 送信機・受信機の位置を示す縦断面図

振を行った。St.3 については急傾斜部であったため人力の足踏みによる振動を与えて起振を行った。

### 3. 研究結果

#### 3.1 融雪型火山泥流の発生規模予測に関する実験結果

写真-10 に例として示したのは、泥流発生実験水路(図-2)において斜面を新雪、落下物質を砂、温度を500度、水路角度を20度、斜面長1m、砂投入量12kgとした場合の流出状況である。ここで、積雪層の最上流部に設置した熱電対が温度感知した時刻を $t=0$ としている。(b)のようにまず雪の表面を高温砂が高速で滑るように落下し( $t=0.4$ s)、大部分の滑走砂の流出(一次落下)が起こり(c)、一旦流出量が低減するが次に雪面に残された高温砂による融雪が起こり(d)、融雪水と砂の混合物の流出が開始し(e)、2段階目の融雪泥流としての流出が生じ(最終落下)(f)、終状態となった(g)。同ケースにおける流出重量を示した図-9からも $t=1\sim 4$ s付近で流出量が明瞭に低減しており、泥流の流出が2段階となったことが確認できた。高温砂の投下後直ちに受け皿に落下した一次落下分は融雪にほとんど寄与しないと仮定し、雪面落下重量から一次落下重量を差し引いた初期雪面堆積重量が融雪に寄与するとした。次に堆積厚は初期雪面堆積長さに一様に堆積すると仮定し、次の式で求めた。

$$\text{堆積厚} = \frac{\text{初期雪面堆積重量}}{\text{堆積密度} \times \text{堆積長さ} \times \text{水路幅}}$$

ただし、堆積密度は別途実施した試験結果より砂は $1.5 \text{ g/cm}^3$ 、鋼球は $4.7 \text{ g/cm}^3$ とした。融雪量は

$$\text{融雪量} = \frac{\text{初期雪面堆積重量} \times \text{物質温度} \times K_w}{\text{雪の融解熱量}(333.6 \text{ J/gK})}$$

で求めた。ただし、砂の比熱は $0.75 \text{ J/gK}$ 、鋼球の比熱は室温で $0.44$ 、 $500$ 度で $0.70$ 、 $700$ 度で $0.87$ とし、 $K_w$ は融雪相当比熱で $K_w = (K_s + a\gamma)^{-1}$ である<sup>9)</sup>。 $K_s$ は固体の比熱、 $a = 0.7 \text{ [g K/(J cm)]}$ はパラメータ、 $\gamma$ は堆積厚である。以上の結果を用い、泥流発生実験水路に敷設した雪量の何倍融かし得るかという指標として融雪可能割合(%)を

$$\text{融雪可能割合} = \frac{\text{融雪量}}{\text{雪密度} \times \text{水路幅} \times \text{雪堆積厚} \times \text{斜面長}}$$

として定義した。

この融雪可能割合とビデオ映像から判断した融雪状態との関係を図-10に示した。ここで、融雪レベルは図右上のように定義することとした。融雪レベルの

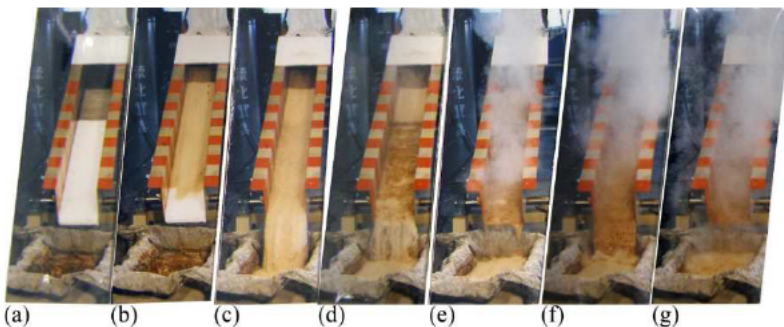


写真-10 泥流流出状況の時間的变化

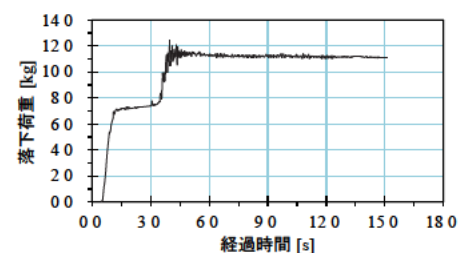


図-9 500度の砂12kgを新雪に落下させた場合の泥流流出重量の時間的变化

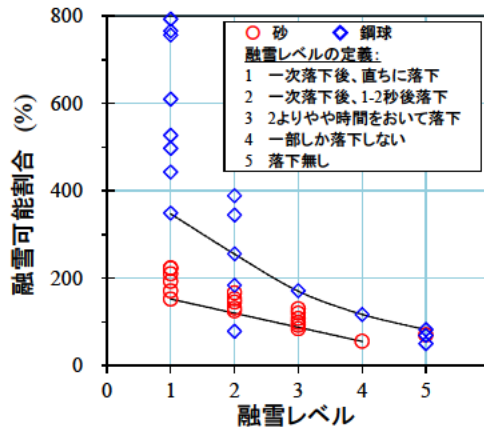


図-10 融雪レベルと融雪可能割合との関係

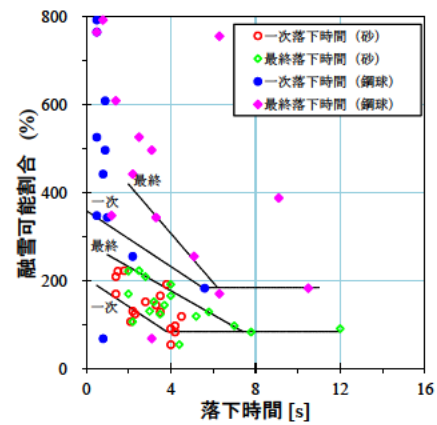


図-11 落下時間と融雪可能割合との関係

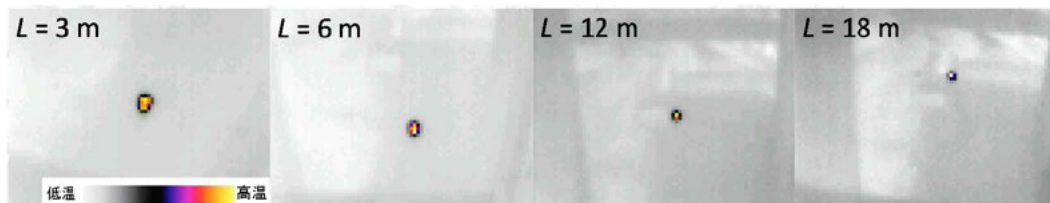


図-12 温水で満たした水槽の距離別熱画像検知状況

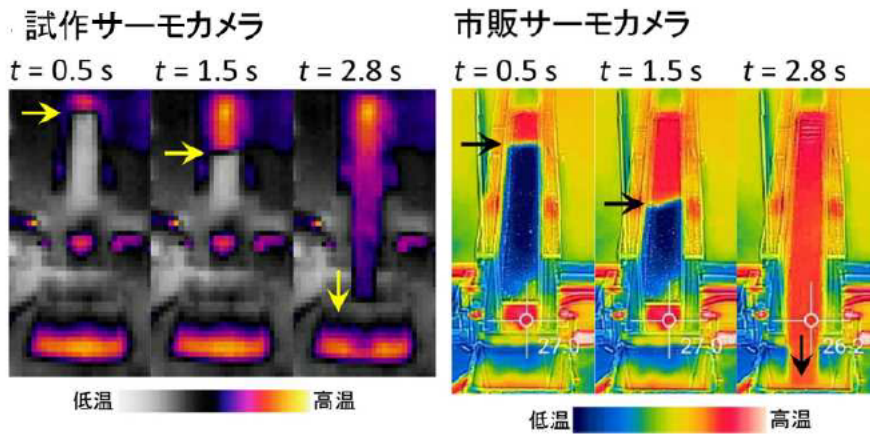


図-13 温水を使用した土石流実験での熱画像計測結果の比較

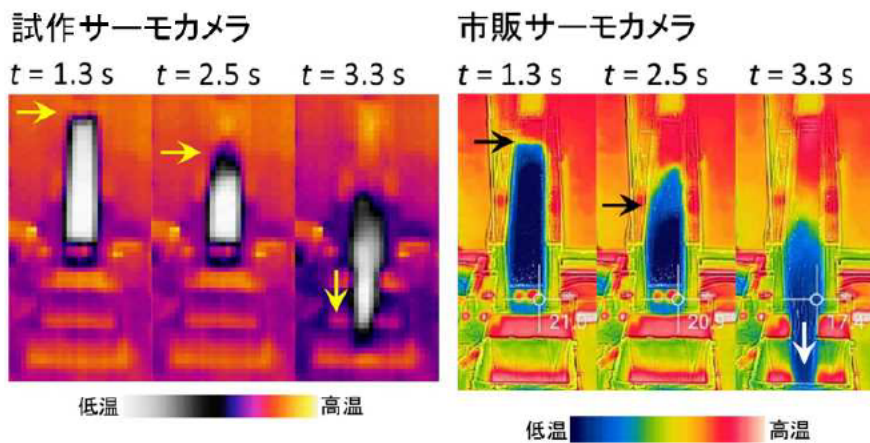


図-14 温水を使用した融雪泥流実験での熱画像計測結果の比較



定義は主観に影響される可能性はあるが、融雪レベルと融雪可能割合の最低値の間に相関を見出すことができる。図-11には、一次落下までの時間あるいは最終的な落下重量が得られた最終落下時間と、融雪可能割合との関係を示した。データのばらつきが大きいいため断言は難しいが、概ね6秒未満の落下時間が短い領域において、鋼球の最終落下時間を除き、概ね平行な直線関係が認められた。

### 3.2 画像による熱検知技術を用いた融雪型火山泥流検知の実験結果

試作サーモカメラがどの程度の距離まで熱源を検知するか実験を行った。直径25cmと小面積の水槽を熱源とする熱画像検知実験の結果、水平距離 $L=3, 6, 12\text{m}$ のケースでは明確に高温域として水槽を検知している(図-12)。

次に水路内に土石流を発生させた際の熱画像計測結果を比較した実験について述べる。図-13に示したのは、左が試作サーモカメラ、右が市販サーモカメラである。下流端から約1.5m離れた地点にカメラを設置し、水路下流側から上流方向を撮影している。画像内では水路上流部に温水が供給開始された時点を時刻0sとして表示している。水路外の高温度領域は、貯水槽・給水ホース内部の温水を検知したためである。図中で側壁側からの矢印によって土石流のフロント位置を示している。水路内に限って見れば、流下開始直後の $t=0.5\text{s}$ から水路を半分程度流下した $t=1.5\text{s}$ 時点、下流部の土砂受けまで土石流が流下した2.8sにわたり、高温領域は試作サーモカメラと市販サーモカメラで概ね一致していることが確認された。

さらに、融雪を伴って泥流が流下する際の熱画像計測結果を比較した実験について述べる。図-14は砂礫層の上部に2cm厚の積雪層を敷設し、その上に温水

を流下させ、泥流を発生させた熱画像計測結果の比較である。試作サーモカメラの結果では、流路内のみ積雪層の低温を検知して周囲は相対的に高温の表示となっている。融雪を伴って泥流が流下するに伴い、フロント位置が下流に推移していく様子が確認でき、これは市販サーモカメラにおいても対応する時刻で同様の傾向が確認できた。ただし、いずれのカメラでも確認できたことだが、この融雪泥流のケースにおいては泥流のフロント部が図-13のケースほど明瞭では無かった。

### 3.3 振動センサを用いた融雪型火山泥流検知の実験結果

#### 3.3.1 積雪層の振動減衰の実験結果

##### 1) 積雪厚別のボウリング球落下による振動検知

積雪厚を変化させてボウリング球落下による振動速度の波形を取得した(写真-11)。図-15に落下高1.0mの振動波形を示す。検知した波形のうち、振幅(最大値と最小値の差: 図-15 積雪厚0cmに示す上限および下限を参照されたい)により、積雪厚と振動検知の関係を求めた。

図-16には、検知速度の大きさと積雪厚との関係および指数関数による近似曲線を示した。積雪厚が大きくなるにしたがい、検知速度波形の振幅が指数関数的に減衰する傾向が確認できた。

ここで、土石流等の振動を実際に検知する場合、振幅の大小だけでなく振幅波形の継続時間も考慮して誤作動を防止することが、実用化に向け検討されている<sup>16)</sup>。

このように、継続時間は泥流等土砂移動の検知基準の設定にあたり重要であるため、積雪厚に応じた振動継続時間との関係を調べた(図-17, 18)。ここでは、ボウリング球の落下高を1.0mとし、落下後に0.15, 0.20,

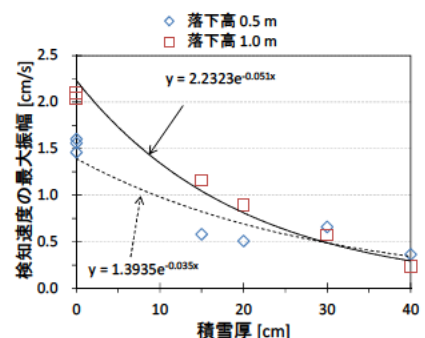
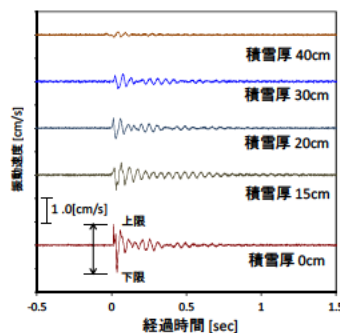


写真-11 積雪厚40cm、落下高0.5mのボウリング球落下状況

図-15 落下高1.0mのボウリング球の積雪厚別振動波形

図-16 積雪厚とボウリング球落下波形の振幅との関係



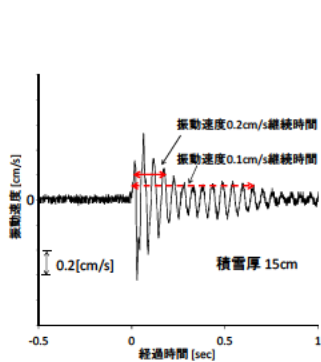


図-17 検知速度の継続時間の模式

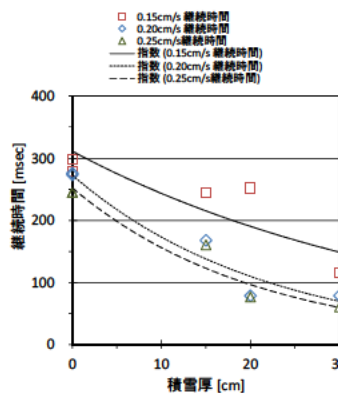


図-18 ボウリング球落下高 1.0m の速度 波形の継続時間

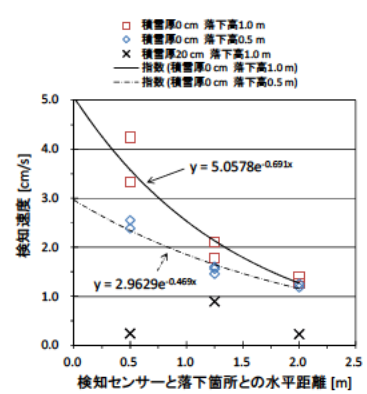


図-19 センサ位置とボウリング球落下位置との振動検知の関係

0.25 cm/s を記録した最初と最後の時間差を継続時間とした。なお、継続後期に発現時間差が 100 ミリ秒以上生じた場合は、落下時刻に近い発現時刻を採用した。図-18 から、計測値は、積雪厚が大きくなるにしたがい、振動速度 0.25 cm/s、0.20 cm/s および 0.15 cm/s とともに継続時間は短縮化する傾向が見られた。図中の曲線は、指数関数による近似曲線である。なお、積雪厚 40 cm では、振動速度の最大値は 0.15 cm/s を下回った。

## 2) センサ設置位置とボウリング球落下位置との距離による振動検知

センサ設置位置とボウリング球落下位置との距離が振動の減衰に影響するか、本実験の水路において、振動源と検知センサとの距離に応じて検知した振幅の大小関係を調べた。その結果を図-19 に示す。この実験では、ボウリング球落下高 1.0m と 0.5m により、水平距離は遠方 2.0 m、中間 1.25 m、近方 0.5 m の 3 地点で比較した。図中の曲線は、指数関数による近似曲線である。積雪厚が 0 cm の場合、ボウリング球落下位置がセンサ設置位置により近いほど、検知した波形の振幅が大きくなる傾向が 1.0m および 0.5m の落下高ともに確認できた (図-19)。また、積雪厚 20 cm の場合、検知速度にばらつきがあり、落下位置から離れることによる明瞭な減衰傾向は見られない。しかし、積雪厚の無い 2 ケースに比較すると検知速度は小さく、積雪層による振動の減衰効果を示唆するものと考えられた。

## 3. 3.2 泥流流下による振動検知の実験結果

速度型地震計の計測値を微分することで加速度に変換し、試作センサの計測値と比較した。どちらのセンサとも鉛直軸の計測値を用い、速度型地震計計測値は、5 データの移動平均 (前 2、当該時、後 2) による

平滑処理を行った。

### 1) センサ別振動波形

敷設厚 5cm の泥流の流下は、概ね 11 秒から 32 秒にかけて発生した (図-20)。写真-12 に泥流の流下状況を示す。なお、敷設厚 5cm の泥流画像は水路右側壁の陰で見えにくいため、便宜的に写真-12 は敷設厚 7.5cm の画像を使用している。図-20 では試作センサは泥流の流下時間帯の振動を計測できている。また、速度型地震計の波形からも泥流の流下時間帯が読み取れる。速度型地震計の概ね 25 秒以降のスパイク状の波形は、撮影画像を確認すると泥流材に含まれる小石のパウンドと考えられる。

一方、敷設厚 5cm の土石流の流下は、概ね 12 秒から 14 秒にかけて発生した (図-21)。試作センサも速度型地震計も土石流流下時に振動ピークをとらえている。写真-13 に土石流流下状況を示す。図-21 では土石流流下の加速度は 22 秒以降に減少している。撮影画像から理由を推察すると、斜面下方と平坦面との接続部で流下した土石が堆積し、流水の減勢を行っていた。22 秒以降、減勢となっていた水たまりが消失し、流水が円滑に流下したと考えられる。

### 2) 泥流流下および土石流流下の波形

試作センサにより、どちらも敷設厚 5cm の泥流と土石流の振動波形を比較した (図-20, 21)。同じ量の土石流用材と泥流用材であったが、一気に土石流が流下したため、土石流の振動継続時間は泥流よりも短かった。また、泥流と土石流とも流下時の振動ピークをとらえている。さらに土石流の振動振幅の方が泥流の振動振幅よりも小さかった。一方、速度型地震計では、土石流流下の振動を明確にとらえている (図-21)。

### 3) 泥流と土石流の振動に関する周波数解析

土石流を振動検知した既往実績<sup>17)</sup>では、フロント部が10~30 Hzを計測したのに対し、後続流はこれより高周波の60~80 Hzを計測したことが示されている。また、土砂濃度が土石流よりも低い泥流質の流体が起こす振動は、土石流より高い周波数帯であることが推察されている<sup>15)</sup>。

本実験でもこの特性がみられるか、速度型地震計の計測結果を用いて周波数特性を解析した。解析に当たり、120 Hzを超える周波数帯に、原因不明のピークが存在することから、泥流および土石流に関して120 Hz未満のローパス処理を行った。図-22は、泥流の敷設厚別周波数特性である。40~60 Hz付近にピークを持つほか、10 Hz付近に小さなピークを持つ。図-23は、

土石流の敷設厚別周波数特性である。40~70 Hz付近にピークを持つほか、10 Hz付近に小さなピークを持つ。

### 3.4 振動データの通信実験結果

#### 3.4.1 観測データの通信実験結果

ランマを振動源とした振動検知試験では、起振位置とセンサ位置との検知距離が10 mにおいて10~15 gal程度、15 mでは5 gal程度の検知が可能であった(図-24)。

データ通信試験は、見通しが良い場合200 mの距離でも通信が可能であった(図-25)。一部、通信の連続性を欠き、欠測期間(グラフの断線箇所)が見られた。また、検知及び送信部を雪中埋設した場合、振動波形は距離50 mでも通信は可能であった。

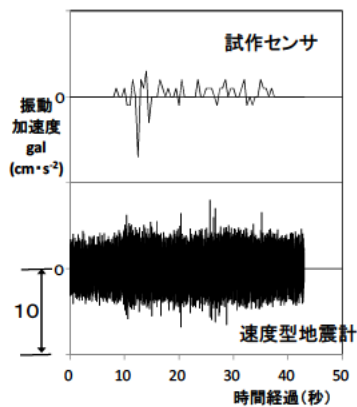


図-20 泥流流下(敷設厚5cm)のセンサ別波形



写真-12 泥流流下状況(陰が映らない敷設厚7.5cmの例)

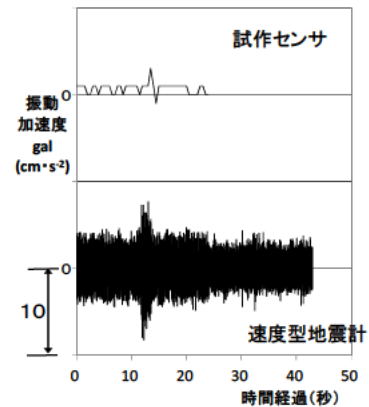


図-21 土石流流下(敷設厚5cm)のセンサ別波形



写真-13 土石流流下状況(敷設厚5cm)

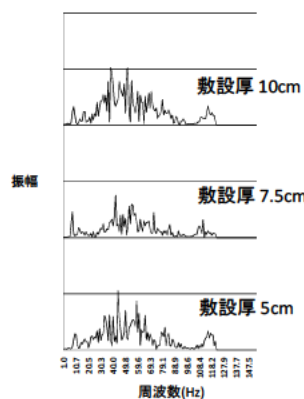


図-22 速度型地震計による泥流の周波数特性

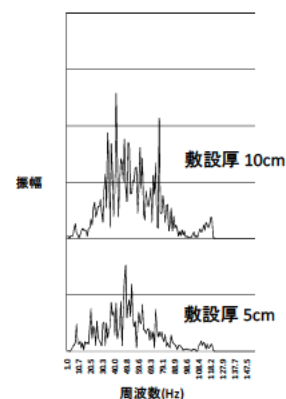


図-23 速度型地震計による土石流の周波数特性



### 3. 4. 2 多点の観測データを1地点で受信するネットワーク実験結果

1) 通信ネットワークについて、代表例として図-26 に St-2 前起振の結果を示す。通信間隔 1.0 秒では 5 地点のデータを1箇所の受信部で順次円滑に受信できていた。St-2 を除くそれぞれの観測所直近で起振して得た振動データの通信状況も、この条件下では通信距離に関わらず安定した受信状況であった。

2) St. 1 を送信地とする同一距離 40 m、通信間隔別の実験結果を図-27 に示す。通信間隔が 0.1 秒の場合では、概ね 1.5 秒間隔の断続受信が見られ(グラフ横軸方向の直線部)、再開後 6 ~ 11 ミリ秒間に 7 ~ 11 個のデータを集中的に受信(グラフの上下線部)した。

### 3. 4. 3 火山山麓における観測データの長距離通信実験結果

図-28 に示したのは、各観測点における振動検知実験の計測結果であり、振動加速度値[gal]を示している。

(a)~(c) は 2 月に実験を行いその時の天候は吹雪であった。まず (a) St. 1 では、ランマによる間欠的な起振によって、振動無し時間帯と振動有りの時間帯で明瞭な差異が生じている。起振時は振動値が明瞭に上昇し、最大で1,000 gal を超える振動加速度が生じている。

(b) St. 2 においても、間欠的な起振によって、振動有無の時間帯は明瞭に分かれている。周辺地盤は St. 1 に比較してやや軟弱であり、振動振幅の絶対値は St. 1 に比較すると小さくなっている。

(c) St. 3 地点は火山砂防情報センターから最も離れた地点であり、人力による起振を行っているが、概ね30 s以後の起振後、振動加速度の記録・送信と振動レベルの判定まで一連の処理を行うことに成功している。

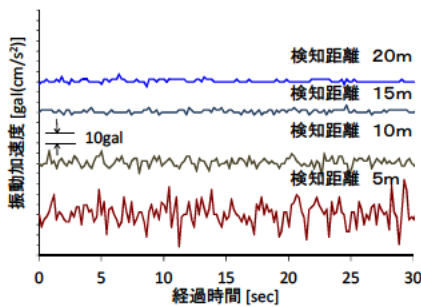


図-24 起振箇所との距離と振動検知波形

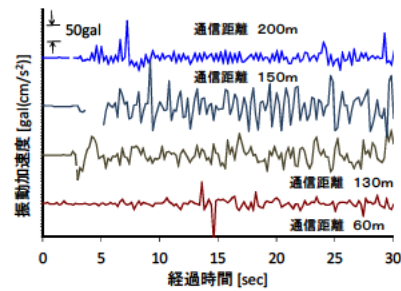


図-25 通信距離と振動波形伝達状況

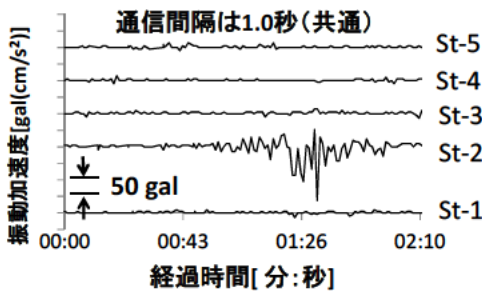


図-26 同時通信による振動波形伝達状況

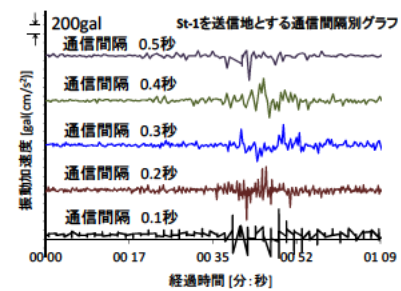


図-27 データ通信間隔による波形伝達状況

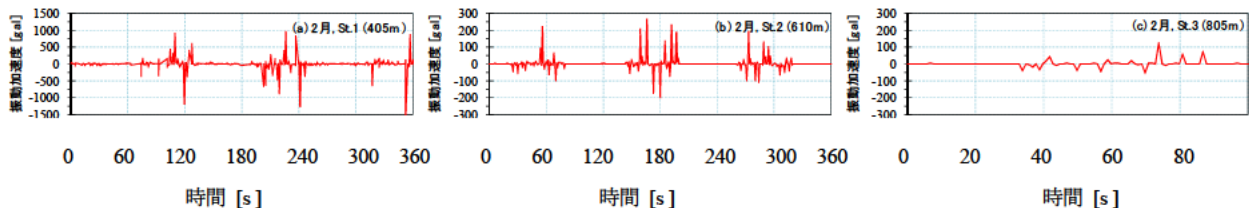


図-28 各観測地点における振動加速度検知実験の結果

## 4. 考察

### 4. 1 融雪型火山泥流の発生規模予測について

熱量と泥流発生規模の関係に焦点をあてた基礎研究を行った。この検討は独自に定義した融雪可能割合と融雪レベルという指標で整理した(図-10)。高温砂では融雪レベル3(実験水路下部に設置した積雪層上面を高温砂が滑走し、その後2秒を超えて砂と雪が混合して流下する状況)以下が泥流に発達しやすいと判断され、この時の融雪可能割合は85%であった。また、融雪レベル4(高温砂と雪の一部が混合して流下する状況)は泥流に発達しない限界と考えられ、この時の融雪可能割合は50%となった。高温鋼球の場合では一次堆積範囲が短く水路上部から雪を融かして流下しながら泥流化するため、砂よりも融雪に多くの熱量が必要となる。泥流が生じる可能性がある融雪レベル3では180%、泥流が生じないと判断できる融雪レベル4では120%と、砂に比して大きな値となっている。

また、高温砂等が雪と混合して流下した最終落下時間は、落下時間が長くなると融雪可能割合が一定となる傾向があり、この融雪可能割合が融雪レベル3に対応していた。

これらのように、融雪可能割合という指標は、高温物質による融雪パターン、ひいては泥流発生規模の推定のために有効であることを確認した。

なお、熱交換や物理的素過程に対して設けた仮定も多く、また本実験を通じて多量の蒸発が見られたが観測が難しく熱量の評価に際しては無視することとした。

### 4. 2 画像による熱検知技術を用いた融雪型火山泥流検知について

温水による土石流発生実験と、積雪層2cmを加えた融雪泥流実験では、熱画像計測結果が異なった。これは、土石流の場合は温水を伴う部分と水路床部で温度境界がはっきりしていたのに対し、融雪泥流の場合は、温水による積雪の融解が発生しており、活発な熱交換が発生し泥流のフロント部分の温度分布がゆるやかに変化していたためと考えられた。しかし、実際には融雪型の火山泥流が発生した場合には、周囲は必然的に低温環境であり、泥流の流下部は相対的に高温であると考えられるから、本稿のサーモカメラでも検知できる可能性がある。またこのシステムが実用化されれば、火山地域の熱画像監視にあたって大幅にコストを縮減できる可能性がある。

### 4. 3 振動センサを用いた融雪型火山泥流検知について

#### 4. 3. 1 積雪層の振動減衰について

本検討では、起振方法と積雪厚等を変化させた実験により、検知波形の比較を行った。積雪厚が大きくなるにしたがい、検知速度波形の振幅が指数関数的に減衰する傾向が確認できた。このことは積雪層の存在が振動検知に及ぼす影響が大きいことを表している。これは写真-11に示したような落下状況から、積雪層の変形がボウリング球落下の位置および運動エネルギーを吸収したことが推察される。さらに、一定の検知速度以上を発現する継続時間も積雪厚が大きくなるほど短縮化する傾向が見られた。また、センサ設置箇所と起振地点(ボウリング球落下箇所)との関係は、水平距離が大きくなるほど振幅が減衰する傾向が確認された。このことは、同程度の起振エネルギーであっても、積雪厚が増加すると雪面上の土砂移動の振動検知が困難になる可能性があることを意味しており、積雪期には注意を要する。

#### 4. 3. 2 泥流流下による振動検知について

##### 1) センサ別振動波形

試作センサは、最大7galの値を計測しており(図-20)、既往の土石流観測事例<sup>15)</sup>から土砂移動の振動検知は可能と考えられる。一方、速度型地震計は高精度なセンサであり、微細な振動を検知することからノイズレベルが高くなったものと推察される。

##### 2) 泥流流下および土石流流下の波形

振動振幅が大きいと考えられた土石流の方が、試作センサでは泥流よりも小さかった(図-20, 21)理由は、主としてデータサンプリング周波数2Hzの影響が考えられる。しかし、試作センサの一義的な目的は、振動を起こす何らかの事象の検知であるため、試作センサは検知機能を有しているといえる。

また、図-20, 21の振動波形や実験上の振動継続時間の長さから、本研究の実験条件では泥流か土石流かは慎重に判別することが望まれる。試作センサは、流下継続時間を振動検知できる(図-20, 21)ことから、およその泥流規模の把握ができる可能性がある。また、誤検知除去のためワイヤセンサを二重設置している場合、一方のセンサに試作センサの使用の実用も考えられる。さらに、振動検知画像監視など他の手法を補完しあうことで試作センサは泥流等の検知確実性を向上させる可能性がある。

##### 3) 泥流と土石流の振動に関する周波数解析

既往文献<sup>15)</sup>において推察されている、泥流流下で発生する振動の主たる周波数が土石流よりも高い周波側であることは、この実験条件では確認できなかった(図-22, 23)。この理由の一つに、実験における縮尺



効果の影響が考えられる。

泥流等の検知にあたり、MEMS 3 軸加速度センサは、振動の有無に関して土砂移動の検知が可能と考えられた。また、流下継続時間の把握が可能であることから、泥流等の移動総量の規模は把握できる可能性が示唆された。しかし、本研究の実験条件であるサンプリング周波数 2Hz では、検知した振動波形から泥流か土石流かを慎重に判別することが望まれる。したがって、泥流や土石流を振動センサにより検知する場合には、適切なサンプリング間隔を検討する必要がある。

#### 4. 4 振動データの通信実験について

##### 4. 4. 1 観測データの通信について

データ通信距離は、見通し等条件が良ければ免許が不要な Zigbee 通信において、モジュール(XBee ZB S2)の公称値 120m を超える場合も確認できた。一部、通信の連続性を欠き、欠測期間(グラフの断線箇所)が見られたことについては、Zigbee 通信の特長である次善の送信先の探索に影響されたこと、通信間隔が 0.2 秒であることおよび無線通信距離の関与が推察される。

##### 4. 4. 2 多点の観測データを 1 地点で受信するネットワークについて

1) 通信間隔が 1.0 秒の場合、送信箇所 5 点の計測データを受信箇所 1 地点で順次円滑に受信できた。通信距離は 177m~40m であり、実験時点での見通しの良さも理由であったと考えられた。

2) 通信間隔が 0.1 秒と短い場合では、概ね 1.5 秒間隔の断続受信が見られ、再開後 6~11 ミリ秒間に 7~11 個のデータを集中的に受信した。この現象は、Zigbee 通信の特長である次善の送信先の探索と、通信再開後の集中的な情報伝達とに影響され、密な通信間隔と無線通信距離との関与で通信負荷の大きさが推察される。

##### 4. 4. 3 火山山麓における観測データの長距離通信について

無線モジュールを XBee ZB (S2C)モジュール(周波数帯域 2.4GHz、屋外見通しでの通信距離は公称値で最大 1,200m)に代えて実験を行った。通信距離は、St. 1 で受信機からの距離 405m、St. 2 は 610m、St. 3 は 805m である。

St. 1 が起震を小休止する間も僅かに振動値が上昇しており、道路橋に近いことや地盤状況により、ノイズを拾いやすい環境であったためと考えられた。また、St. 1 の設置点が台地直下部に近接しており(図-8)、直進性の高い 2.4GHz 帯では不通の可能性も考えられ

ていた。しかし、円滑な通信ができたことから、通信の良否は現場確認が重要であることがわかった。この通信実験の時期は木の葉が落ちた時期であることから、通信条件は比較的良好であったと考えられる。データ通信量の制約が小さければ、電波が回折しやすい 460MHz や 920MHz 帯の使用が安定的な通信に寄与する。一方 St. 2,3 においては 600~800m の距離で良好な無線通信に成功したことがわかった。

#### 5. まとめ

本研究では、振動等による泥流検知、特に融雪型火山泥流の検知について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 融雪可能割合という指標を本研究では定義した。これは現地に存在する積雪量の何倍融かし得る熱量を有しているかという意味である。融雪可能割合は、高温物質による融雪パターン、ひいては泥流発生規模の推定のために有効であることを確認した。
- 2) 小型かつ安価なサーモカメラシステムでも、流下する泥流を捕捉できる可能性があることがわかった。
- 3) 積雪厚が大きくなるにしたがい、検知速度波形の振幅が指数関数的に通減する傾向が確認できた。同様に、センサ設置箇所と起振地点(ボウリング球落下箇所)との関係は、水平距離が大きくなるほど振幅が減衰する傾向が確認された。
- 4) 試作センサによる泥流流下の観測加速度は、既往の土石流観測事例からみて、泥流の振動検知は可能と考えられる。また、誤検知除去のためワイヤセンサを二重設置している場合、一方のセンサに試作センサを使用することが考えられる。
- 5) 通信の良否は現場確認が重要であることがわかった。また、通信網の早期設置のため免許が不要な無線を使用する場合には、通信データ量、通信間隔および通信距離など通信負荷への配慮が必要と考えられた。

今後は、現地スケールの土砂移動の計測、実験条件を現実の現象により近づけることおよび実験データを蓄積させることで、泥流検知の確実性を高め、減災や防災に貢献していくことが重要である。

#### 参考文献

- 1) 例えば、南里智之、樽根基弘、山廣孝之、名取哲哉、金子幸正、長谷川浩二、新谷融：1926年十勝岳火山泥流

- の体験情報聞き取り・現地痕跡調査による流下特性,  
砂防学会誌, Vol.56, No.5, pp.33-44,2004.
- 2) 小野祐輔, 清野純史, 小林望, 新垣芳一, 高橋天平, 小型センサーを用いた建造物の地震被害の即時判定法の提案, 土木学会論文 A1(構造・地震工学), Vol.65(1), pp.705-709, 2009.
  - 3) 門田峰典, 宮森保紀, 綿崎良祐, 三上修一, 齊藤剛彦, 実損傷を有する横断歩道橋の補修によるモード形状の変化, 構造工学論文集 A, Vol.61A, pp.143-152, 2015.
  - 4) 水谷佑, 木下篤彦, 高原晃宙, 石塚忠範, 能和幸範, 堤大三, 宮田秀介, 佐藤勇, 斎藤一裕, 安価かつ簡素な土砂移動発生時刻記録装置の開発と現地検証の試み, 平成 26 年度 砂防学会研究発表会概要集 B, pp.390-391, 2014.
  - 5) 例えば, 大角恒雄, 浅原裕, 下川悦郎: 野尻川における土石流振動特性の変化に関する一考察, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2008.
  - 6) 阿部孝章, 伊藤丹, 三浦敦禎: 融雪型火山泥流の発生規模予測に関する実験的研究, 平成 25 年度砂防学会全国大会, 2013.
  - 7) Abe, T. Itoh, A. and Miura, A. : A basic study on the snowmelt process by the pyroclastic flow and the discharge estimation of the snowmelt-type mud flow, Proceedings of the 12th international Symposium on River Sedimentation, 2013.
  - 8) 阿部孝章, 藤浪武史, 船木淳悟: 小型 PC ボードによる火山泥流の熱画像検知に向けた実験的検討, 平成 28 年度砂防学会全国大会, 2016.
  - 9) 藤浪武史, 阿部孝章, 船木淳悟: 積雪層を介した土砂移動の振動検知に関する実験的検討, 土木学会西部支部, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム, 2014.
  - 10) 藤浪武史, 伊波友生: MEMS 振動センサーを用いた泥流検知に関する実験的研究, 土木学会西部支部, 第 9 回土砂災害に関するシンポジウム, 2018. (投稿中)
  - 11) 藤浪武史, 阿部孝章, 船木淳悟: 簡易振動センサーによる寒冷環境下での検知及び通信に関する検討, 平成 27 年度砂防学会全国大会, 2015.
  - 12) 阿部孝章, 藤浪武史: 高密度土砂移動モニタリングのための無線式簡易振動センサーの構築及び屋外試験への適用, 土木学会北海道支部, 平成 27 年度年次技術研究発表会, 2016.
  - 13) 藤浪武史, 阿部孝章, 船木淳悟: 無線式簡易振動センサーネットワークによる検知及び通信に関する検討, 平成 28 年度砂防学会全国大会, 2016.
  - 14) 阿部孝章, 藤浪武史, 田中忠彦, 矢部浩規: 汎用小型マイコンボードを活用した無線式簡易振動センサーの冬期現地試験への適用について, 平成 29 年度砂防学会全国大会, 2017.
  - 15) 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: 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, pp.3-6, pp.33-34, pp.62-66, 2012.
  - 16) 柳町年輝, 能和幸範, 武澤永純, 石塚忠範: 新型振動検知式土石流センサーの開発および実用化に向けた検討 砂防学会研究発表会概要集, 524-525, 2011.
  - 17) 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, pp.157-204. 1978.



# A STUDY ON DEVELOPMENT OF MONITORING SYSTEM FOR VOLCANIC MUD FLOW IN SNOWY COLD REGION

Budget : Grants for operating expenses, General account

Research Period : FY 2013-2017

Research Team : Water Environment Reseach Group(River Engineering Research )

Author : FUJINAMI Takeshi

YABE Hiroki

FUNAKI Jungo

ITO Akashi

MAEDA Shunichi

INAMI Yu

ABE Takaaki

TAKEGAHARA Ichiro

TANAKA Tadahiko

SASAKI Yasunori

**Abstract :** In order to minimize the damage, detection of early occurrence is important for volcanic mud flow, whereas wire sensors are widely used as detection equipment. On the other hand, it is thought that the method of detecting vibration caused by earth and sand migration has a proven track record of debris flow and it is possible to detect multiple earth moving movements. Furthermore, with the development of semiconductor technology in recent years, compact and inexpensive vibration sensors and image-based heat detection sensors have also become widespread. In this research, heat detection, vibration detection, and communication test were conducted to develop a monitoring system using a compact, inexpensive vibration sensor and the like using MEMS technology. As a result, it turned out that there was a possibility of practical use.

**Key words:** Volcanic mud flow, vibration detection, 3 axis MEMS vibration sensor, monitoring system