

# MEMS 振動センサを用いた泥流検知に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DETECTION OF MUD FLOW BY  
MEMS VIBRATION SENSOR

藤浪 武史<sup>1</sup>・伊波 友生<sup>1</sup>  
Takeshi FUJINAMI and Yu INAMI

<sup>1</sup> 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail: fujinami-t22aa@ceri.go.jp

E-mail: inami-y@ceri.go.jp

*Key Words: detection of mud flow, flume experiment, mems vibration sensor*

## 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。このため、2018年1月23日の草津白根山噴火時にも泥流の発生が懸念された。泥流災害の特徴は、高速度で移動し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、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、下流市街の住民に対する警報の発令や、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、泥流発生の早期検知が重要である。

従来、土石流など土砂移動の検知には、ワイヤセンサが多用されている。しかし、積雪寒冷地では積雪荷重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。一方、振動検知は複数回の土砂移動の検知が可能と考えられ、また、汎用品を使用すると安価に多点の整備や検知が可能である。しかし、土石流の振動検知実績は豊富にある<sup>2)</sup>が、泥流の振動検知実績は見当たらない。

筆者らのグループはこれまで、安価で汎用小型の

振動検知センサを試作し、積雪層を媒介とする振動検知<sup>3)</sup>や検出したデータの送受信試験<sup>4)</sup>等を行ってきた。これを踏まえ、より実現スケールに近い検知実績が求められるが、泥流は発生頻度の点から、検知の機会は限られている。本研究の目的は、先行研究を受けてこの試作センサによる泥流検知と泥流や土石流の規模の把握の可能性等を、より実現スケールに近い規模における基礎的実験により確認することである。

## 2. 実験方法

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0.5m、斜面長7.6m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月上旬に寒地土木研究所が所有する北海道石狩市の水理実験場において気温-2.0℃～+1.3℃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3軸MEMS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2Hzに設定したセンサで



写真-1 実験斜面の概要

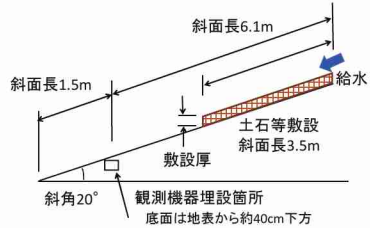


図-1 実験斜面の模式

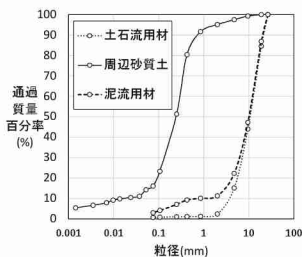


図-2 流下材料の粒径分布



写真-2 計測機器の埋設状況

ある。二つ目は精度の高い計測と振動波形取得を意図し、速度型地震計(CDJ-S2C-2)をサンプリング周波数 500Hz に設定したセンサである。泥流や土石流の流下にあたり、予備実験において流下材料等の比重調整を試行錯誤したが、水の分離等が生じた。そのため、本実験では、斜面上半分の 3.5m に泥流材等を敷設し、毎秒 5.4L の一定量の水を敷設厚に関わらず給水し泥流等が発生させた。給水方法は、ポンプを用いて実験水路左端において流路幅に対して均等に給水した(写真-1, 図-1)。一方、泥流と土石流の違いは、流下材料に着目して、水と微細砂やシルト分が卓越した流れを泥流とし、水と砂礫あるいは石礫との混合物の流れを土石流と設定した<sup>5)</sup>。土石流材料は、購入砂利をそのまま使用し、泥流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-2)。泥流材の粒径加積曲線は、十勝岳火口から約 20 km 離れた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。右方緑色の容器に試作センサを収納しており、左方の円柱型橙色は、速度型地震計である(写

真-2)。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, 10cm)の泥流材、土石流流下を想定した敷設厚 2 種(5, 10cm)の土石流材の計 5 ケースを、各ケース 1 回ずつ振動検知実験を実施した。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。解析対象とした時間は、泥流や土石流が計測地点に到達する 0.1 秒前からの約 1 秒間である。

### 3. 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。グラフ横軸の時間経過 0

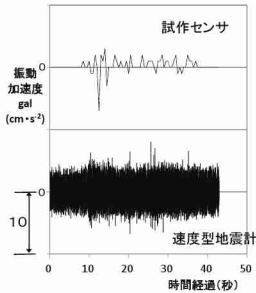


図-3 泥流流下（敷設厚 5cm）のセンサ別波形



写真-3 泥流流下状況（陰が映らない敷設厚 7.5cm の例）

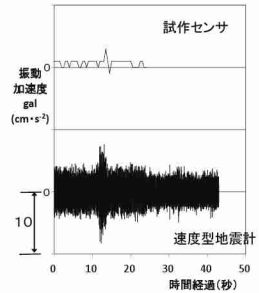


図-4 土石流流下（敷設厚 5cm）のセンサ別波形



写真-4 土石流流下状況（敷設厚 5cm）

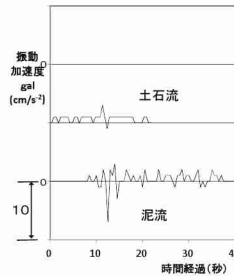


図-5 試作センサによる泥流と土石流の波形（敷設厚 5cm）

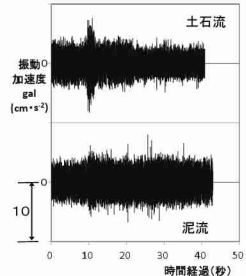


図-6 速度型地震計による泥流と土石流の波形（敷設厚 5cm）

秒は給水開始時刻である。

### (1) センサ別振動波形

敷設厚 5cm の泥流は、10 秒から 15 秒にかけて大部分が流下し、残存する流れが 40 秒まで継続した（図-3）。写真-3 に泥流流下状況を示す。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いため、便宜的に写真-3 は敷設厚 7.5cm の画像を使用している。流下時間は、泥流等の流下により振動検知を開始した時点から、泥流等が計測地点を流下終了した時までを、画像と振動波形により求めた。図-3 では試作センサは泥流の流下時間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、12 秒から 14 秒にかけてすべて流下した（図-4）。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-4 に土石流流下状況を示す。図-4 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。

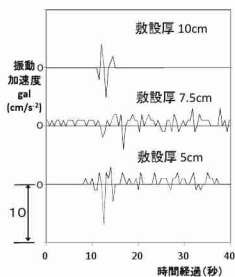


図-7 試作センサによる敷設厚別泥流の波形

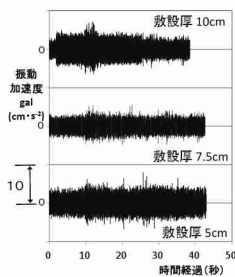


図-8 速度型地震計による敷設厚別泥流の波形

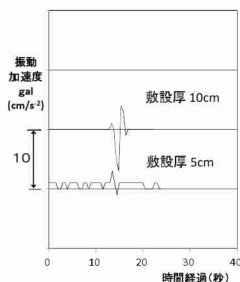


図-9 試作センサによる敷設厚別土石流の波形

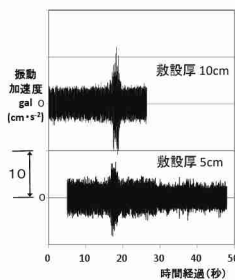


図-10 速度型地震計による敷設厚別土石流の波形

## (2) 泥流落下および土石流落下の波形

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-5)。土石流の振動継続時間は、泥流よりも短かった。また、泥流と土石流とも落下時に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、土石流落下の振動を泥流よりも明確にとらえている (図-6)。また、図-5 と図-6 とを比較すると、泥流の波形は試作センサよりも速度型地震計の方が不明確である。

## (3) 泥流落下および土石流の敷設厚の波形

泥流の敷設厚別の振動波形を、試作センサにより比較した (図-7)。敷設厚 7.5cm は、概ね 10 秒から 18 秒にかけて大部分が落下し、残存する流れが 40 秒まで継続した。敷設厚 5cm および 7.5cm は、泥流の落下時間 10 秒から 40 秒にかけてとらえている。

泥流の敷設厚 10cm は、15 秒から 18 秒にかけてす

べて落下した。振動波形は土石流落下に類似している。図-8 では、泥流敷設厚 10cm の加速度が 25 秒以降減少しているが、その理由は 3. (1) に示した土石流敷設厚 5cm と同様と考えられる。

図-9 に土石流の敷設厚 5cm および 10cm の試作センサによる振動波形を示す。敷設厚 10cm は、17 秒から 19 秒にかけてすべて落下した。敷設厚 10cm の波形は一山の波形が明確である。波形から見て、土石流の敷設厚 5cm よりも泥流の 10cm 厚の方に類似している。

## (4) 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>6)</sup>では、フロント部が 10~30Hz を計測したのに対し、後続流はこれより高周波の 60~80Hz 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は、より高周波であることが推察されている<sup>7)</sup>。本実験でもこの特性がみられるか、速度型地震計の

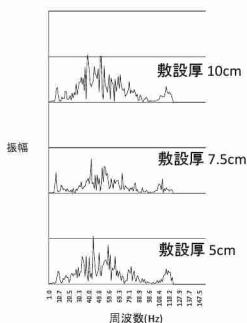


図-11 速度型地震計による泥流の周波数特性

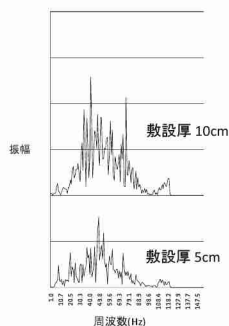


図-12 速度型地震計による土石流の周波数特性

計測結果(図-8, 10)を用いて周波数特性を解析した。解析に当たり、120Hz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120Hz未満のローパス処理を行った。図-11は、泥流の敷設厚別周波数特性である。40～60Hz付近にピークを持つほか、10Hz付近に小さなピークを持つ。図-12は、土石流の敷設厚別周波数特性である。40～70Hz付近にピークを持つほか、10Hz付近に小さなピークを持つ。

#### 4. 考察

得られた結果をもとに、振動検知センサの現地適応性という観点から考察を加える。本実験においても、模型実験という性質上縮尺の影響は免れ得ないが、これを念頭に置いた上で(定性的に)振動検知センサにおける入出力の関係性や、土石流と泥流の判別可能性について考察する。

##### (1) センサ別振動波形

試作センサは、敷設厚 5cm の泥流流下時に最大 7gal の値を計測しており(図-3)、既往の土石流観測事例<sup>7)</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) 泥流下および土石流流下の波形

敷設厚が同じ 5cm でも、振動加速度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-5)。その理由は、土石流材の流下

が集散的な流動となり大きな振動を発生しなかった可能性が考えられる。しかし、速度型地震計では流下時の振動加速度(換算)は土石流の方が大きかった(図-6)。これらから、特性に応じたセンサの選定やサンプリング周波数の設定が重要である。

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。そのため、試作センサは検知機能を有しているといえる

また、図-5に示す振動波形や振動継続時間の短さから、本研究の実験条件では泥流か土石流かを判別することは難しいと考えられる。

##### (3) 泥流下および土石流の敷設厚別の波形

試作センサは、流下時間を振動検知できる(図-7, 9)ことから、およそその泥流および土石流規模の把握ができる可能性がある。また、画像監視など他の手法を補完することで泥流等の検知確実性を向上させる可能性がある。

##### (4) 泥流と土石流の振動に関する周波数解析

既往文献<sup>7)</sup>に推測されている、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-11, 12)。この理由は、泥流材や土石流材の差異やそれらの敷設厚の差異に関わらず、流下時の振動における周波数に類似の流れが発生したと推察すること、もう一つはローパス処理が 120Hz 未満のため、卓越周波数の差異が生じなかったことと推察する。

#### 5. まとめ

泥流等の検知にあたり、3軸MEMS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判断することは難しい。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。

これら汎用品を使用した安価なセンサの特徴を活かすことにより、画像監視など他の手法と補充しあうことで、泥流等の検知確実性を向上させる可能性がある。

今後は、実験条件を現実の現象により近づけることや実験データを充実させることで、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、樽林基弘、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) 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.
- 3) 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研究、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.
- 4) 阿部孝章、藤浪武史、伊藤丹、西村義：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.
- 5) 水理公式集 平成11年版 pp.146-147, 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, pp. 157-204. 1978.
- 7) 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. 62-66, 2012.

(2018. 5. 18 受付)