

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF VIBRATION DETECTION THROUGH
THE SNOW LAYER CAUSED BY SEDEIMENT MOVEMENTS

藤浪 武史¹・阿部 孝章²・船木 淳悟³

Takeshi FUJINAMI, Takaaki ABE and Jungo FUNAKI

¹(独)土木研究所寒地土木研究所研究連携推進監(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

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

²(独)土木研究所寒地土木研究所寒地水圏研究グループ(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

E-mail: abe-t@ceri.go.jp

³(独)土木研究所寒地土木研究所寒地水圏研究グループ(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

E-mail: funaki-j22aa@ceri.go.jp

Key Words: vibration sensor, vibration detection, snow layer, sediment movement

1. はじめに

雪害や雪崩の他、積雪が関与する災害として融雪型火山泥流があげられる。日本国内では1926年5月の十勝岳大正泥流の事例が有名であり、甚大な被害を発生させていることが知られている。(写真-1)。

1926年の十勝岳では、泥流の移動速度は速く、爆発後わずか25~26分で火口から25kmの上富良野原野に達し²⁾、また、南里ら³⁾の報告では泥流の速度は、富良野川渓谷内で11~17m/sであったと推定



写真-1 残雪期の十勝岳と泥流流下が想定される白金温泉街(国土交通省旭川河川事務所HP¹⁾から引用)

されている。その上、土砂移動量が大きく約1,900万m³の泥流が発生し、結果として死者数は144名にものぼるという甚大な被害を発生させた²⁾。さらにここ数年、十勝岳では山体浅部の膨張や発光現象などが観測され、今後の火山活動の推移に注意を求めるべきである⁴⁾。

一方、積雪寒冷地における今後の火山活動に対する減災には泥流の発生及び流下のメカニズム解明と早期検知が大きく貢献すると考えられる。そのため、融雪から泥流の発生、流下について予測する研究が近年進んでいる。宮田ら⁵⁾は、融雪型火山泥流について、発生時の物理プロセスを考慮した予測手法を確立するために、熱交換・融雪モデル及び泥流モデルに融雪水集水モデルを組み込んだ手法を提案している。また、堤ら⁶⁾は、融雪型火山泥流発生における、特に積雪層の融解と融雪水の浸透プロセスに焦点を絞り、その発生機構を実験的に検討している。

ところで、泥流の流下など土砂移動検知方法として、ワイヤセンサが現在広く使用されている。ワイヤの切断に基づき検知するという単純な機構のため判定が容易である反面、一度切断されてしまうとその後の土砂移動検知が困難であることが課題とされている。特に積雪寒冷地域の火山では、積雪の沈降

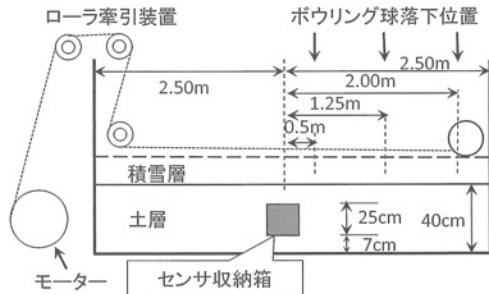


図-1 実験水路の概要、ボウリング球落下位置及びローラ牽引の模式図

によるワイヤの切断が発生することがあり、一部の現場ではそれを防止するための積雪除去等を目的とした定期的な維持管理など、コスト面での負担が大きいことも課題となっている。こうしたワイヤセンサ特有の課題を解決する代替手段として、振動検知式土石流センサーが活用⁷⁾されている。しかし、土砂移動の発生を判定する閾値の設定が困難であるなどの課題が存在し、さらに積雪寒冷地域の火山では、概ね10月から翌年の6月まで冠雪があり、積雪が存在する場合の振動減衰に関する知見に乏しく、実際的な基準を定めることが難しいのが現状である。

これらの背景から、本稿では積雪層が介在する場合に、土砂移動に伴う振動がどの程度減衰するか、その結果、積雪層上の土砂移動に関する振動検知がどの程度確実かを明らかにすることを目的とした。そのため本稿では、積雪層を介した振動検知に関する室内実験により検討を行った。

2. 実験方法

実験装置は、図-1のような長さ5.0m、幅1.0m、高さ1.2m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5mmの硬質ゴムを設置した。水路には厚さ40cmの土層を配置し、水路底面から直接振動を伝えない目的で7cmの土層をはさみ外形高25cmのセンサ収納箱を埋設した（図-1中央下部）。

土層は、焼却灰と珪砂（主に4号）を体積比約1:2の割合で混合した。この比率は、センサ設置を想定している十勝岳山麓において、南里らの粒度分布調査³⁾を参考に設定したものである。土質試験の結果、 D_{50} は0.289mm、均等係数は2.0、土粒子の密度は2.687g/cm³であった。積雪厚 h_s は0, 15, 20, 30, 40cmの5段階に設定し実験を行った（表-1）。

計測センサは、主に地震観測で使用されている2Hz

表-1 起振及び積雪層の条件

起振手段	積雪厚 h_s [cm] (密度[g/cm ³])
	0 (-)
ボウリング球落下	15 (0.29)
or	20 (0.34)
ローラ走行	30 (0.43)
	40 (0.23)



写真-2 振動検知センサ（円筒形オレンジ）の設置状況



写真-3 実験水路の概況と落下前のボウリング球の状況

3成分速度型地震計（CDJ-S2C-2、中国 Chongqing Geological Instrument Factory社製）を使用した（写真-2）。サンプリング数は毎秒1,000回、応答曲線図の上限は100Hzである。また、電圧で得られる出力値は換算係数2.0V/(cm/s)により速度表示(cm/s)への変換を行った。併せて、測定レンジ±2GのMEMS 3軸加速度センサ（Kionix社製、KXR94-2050）を使用して計測を行った。これは加速度センサであるため、出力値を加速度(cm/s²)に変換して検討に用いた。

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⁸⁾による方法と、土層上や積雪層上での土石流や泥流を模擬したローラ走行⁹⁾による方法により行った。ボウリング球（約5.1kg）落下によるパルス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）0.5mと1.0mの2種を実施した（写真-3）。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 $L=1.25\text{m}$ を主体とし、 $L=0.5\text{m}$ と $L=2.0\text{m}$ のケースは積雪厚2種類（0cm及び20cm）で行った。また、ローラ走行による連続的な振動を与えるため、幅50cm、直径20cmの塩化ビニルパイプの内側及び外側表面にボルトを打ち、更に石礫を封入したローラ（約5.3kg）を約55cm/sの速度で牽引した（写真-4）。これらの牽引装置は

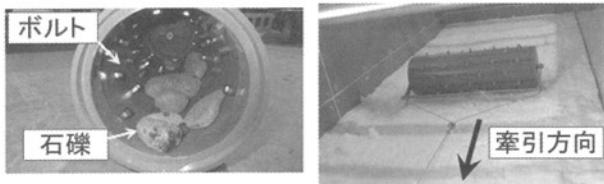


写真-4 ローラ内部の状況(左)とローラ牽引状況(右)

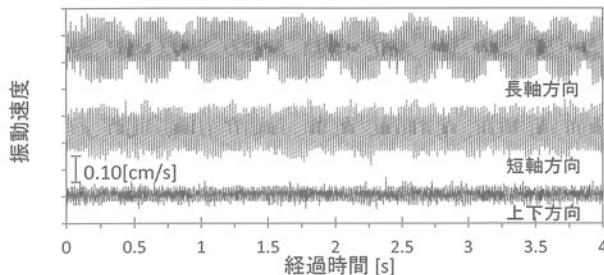


図-2 定常状態の実験水路の振動状況

実験水路に干渉しないよう独立な構造としており、図-1 左側のモーターに接続されている。

3. 実験結果と考察

(1) 常時微動波形の分析

まず、本稿で使用する実験水路に対し、この水路自身が共振するなど振動に影響していないか確認を行った。本稿で述べる上下方向とは、重力加速度が作用する方向で図-1における上下方向、長軸方向とは延長 5 m 実験水路の長軸方向で図-1における水平方向であり、短軸方向とは実験水路の幅 1 m の短軸方向で図-1における紙面に垂直な方向を指す。

土砂層 40 cm 内部にセンサ収納箱を埋設し敷均した状態で、定常状況の振動を計測した結果を示したのが図-2 である。水平面の振動（長軸方向及び短軸方向）が最大で 0.1 cm/s を超える振幅で発生しているが、上下方向の振幅は最大でも 0.1 cm/s を超えていない（図-2 下部）ことから、水平方向に比較して上下方向のノイズレベルが低いことがわかる。この理由として、重力加速度の影響を常に受けている上下方向に対し、影響を受けにくい水平方向の振動を受感したものと推察される。以降の波形分析は主に上下方向の波形について行うこととする。なお、実験水路の重量は土砂だけでも約 3.6 t（土砂量約 2 m³）のため、水平方向の振動は慣性力が大きい。本稿では紙面の都合上割愛するがこの振動はすべての実験ケースに発生していた。これら長軸方向と短軸方向の固有周期は、ともに 50 Hz 付近に卓越しており、交流電源 50 Hz の影響が推察される。これに関しては電源の安定化装置の使用により除去できる可能性がある。

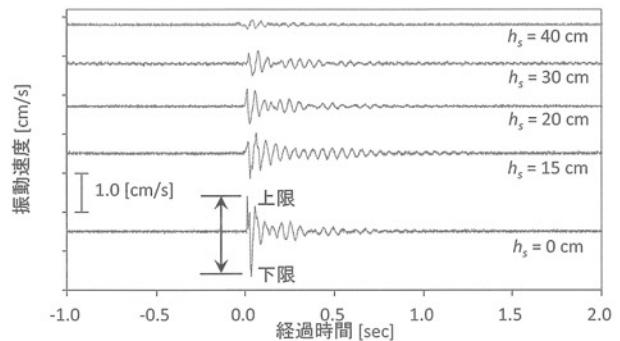


図-3 ボウリング球落下(高さ 1.0 m)の振動波形

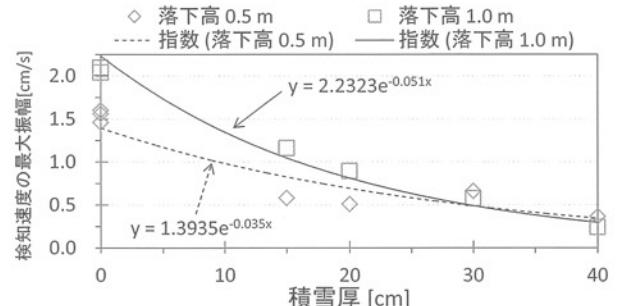


図-4 積雪厚とボウリング球落下の検知速度波形の振幅との関係

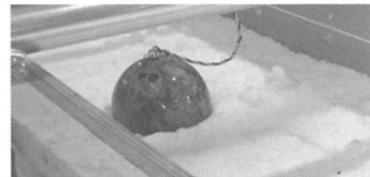


写真-5 積雪厚 40 cm、落下高 $h = 0.5$ m のケースにおけるボウリング球落下痕跡

(2) 積雪厚とボウリング球落下による振動検知

a) 検知した振動波形

積雪厚を変化させてボウリング球落下による振動波形を取得した。図-3 に落下高 1.0 m 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-3 積雪厚 0 cm に示す上限及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-4 には、検知速度の大きさと積雪厚との関係を示した。なお積雪厚 0 cm において、落下高 0.5 m は 3 回、落下高 1.0 m は 2 回の試行を行った。また、積雪厚 15 cm 以上は各落下高で 1 回試行した。積雪厚が大きくなるにつれ、検知速度波形の振幅が指数関数的に遞減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-5 に示したような落下痕跡から、積雪層の変形がボウリング球落下の位置及び運動エネルギーを吸収したことが推察される。なお、距離減衰に関する検討は、本節の b)の項で言及することとする。

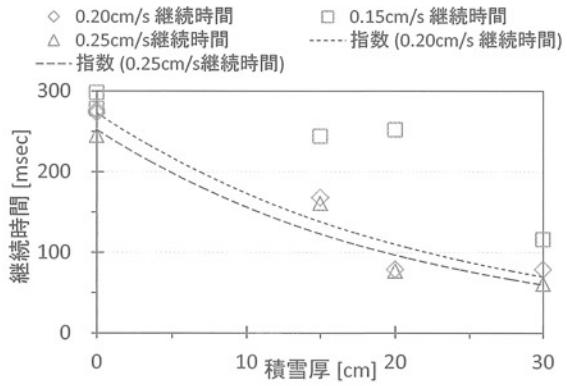


図-5 ボウリング球落下による設定速度以上を検知した継続時間

冬期の山腹斜面で得られる雪に関する情報は、現実的には積雪深のみである場合が多いため、本稿では振動波形の減衰や振動検知の傾向等の取得を主目的とし、積雪密度や空隙など雪質の調製は行わなかった。

ここで、土石流等の振動を実際に検知する場合、振幅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¹⁰⁾。このように、継続時間は泥流等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-5)。ここでは、ボウリング球の落下高を1.0 mとし、落下後に0.15, 0.20, 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。併せて、検知速度の大小と継続時間の長短との関係について傾向を把握するため指数関数による回帰線を図中に示した。なお、試行回数は積雪厚0 cmにおいて2回、積雪厚15 cm以上はそれぞれ1回の試行であった。

図-5から、計測値は、積雪厚が大きくなるにしたがい、振動速度は3種類の速度ともに継続時間は短縮化する傾向が確認された。特に振動速度0.25 cm/s及び0.20 cm/sは明確な遞減傾向が見られた。振動速度が遅い0.15 cm/sに関しては、継続時間にばらつきが大きくノイズの影響が推察される。これらのこととは、振動速度と継続時間との適切な設定により、雪面上の土砂移動を精度良く振動検知する可能性を示している。本実験の条件では振動速度0.25及び0.20 cm/sの場合、積雪厚0 cmに比べ30 cmではともに継続時間が1/3程度に短縮することが実験的に確認された。

これは、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。なお、積雪厚40 cmでは、振動速度は

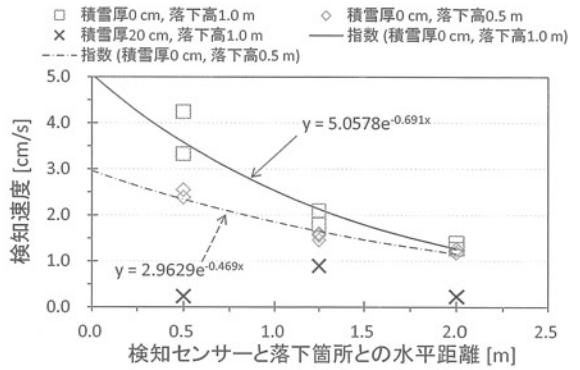


図-6 センサ設置位置とボウリング球落下位置との振動検知の関係

いずれも設定した速度を下回る計測値であった。

b) 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

栗原ら¹¹⁾は、地震時の距離減衰を考慮した最大加速度から、崩壊土砂量推測の可能性について考察した。このような距離減衰が本実験の水路においても見られるかどうか、振動源と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。積雪厚0 cm 落下高0.5 m のケースでは、水平距離1.25 mのみ3回試行し、その他の積雪厚0 cm のケースは、落下高及び水平距離に関わらずそれぞれ2回の試行とした。なお、積雪厚20 cm はいずれのケースも1回の試行であった。

その結果を図-6に示す。本実験では、ボウリング球落下高1.0 mと0.5 m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。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1.0 m及び0.5 mの落下高とともに確認できた(図-6)。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。

(2) 積雪層がある場合のローラ起振による振動検知
ここでは、融雪型火山泥流の流下を想定して、写真-4に示した礫を内蔵するローラの走行により連続的な起振を行い、検知される振動の強さに関する検討を行った。図-7は積雪層が存在する場合のローラ起振時の地震計とMEMS 加速度センサによる計測波形比較の一例である。図中のt=3~12 s付近でローラ牽引を行っているが、両者の波形は大きく異なっており、地震計の長軸方向計測は常時微動に埋もれてしまい振動の把握が困難であった。このように本節で示す検討においては、計測される振幅が

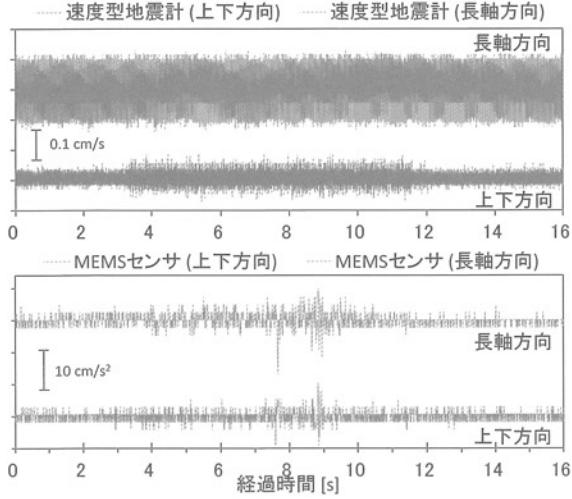


図-7 ローラ起振時における地震計と MEMS センサとの振動波形比較（積雪厚 15 cm のケース）

ボウリング球に比較して小さく、速度型地震計を使用した計測が困難であった。そのため、同じセンサ収納箱に併設した MEMS 加速度センサにより計測した値を用い検討することとした。

積雪厚を変化させた 5 ケースにおいて、センサにより検知された加速度のうち上下方向の成分を図-8(a)に、水路長軸方向の成分を(b)に示した。 A_z , A_x はそれぞれ上下方向、長軸方向の加速度を表す。(a)の上下方向成分については、積雪層無しのケースで見られたローラ走行による複数の山型の波形が、積雪厚 15 cm で顕著に減衰し、積雪厚 20 cm 以上ではほとんど常時微動と区別が付かなくなる結果となった。これは、ローラ走行による振動は上下方向、鉛直方向において積雪層に吸収されてしまうことを示唆する結果である。

次に、水路長軸方向、すなわちローラの走行方向の振動波形を示した同図(b)を見ると、積雪厚 20 cm 程度まではわずかな山型波形が確認できるが、30 cm 以上の積雪厚ではやはり不明瞭となった。しかし積雪厚 40 cm のケースでも $t = 6 \sim 8$ s 付近ではわずかな振動加速度を検知している。概して、図の下方から上方に向かい、積雪層厚が大きくなるにつれて振動の最大振幅が減少する傾向が見られた。ここでは、ローラの走行による振動と、ローラ内部の礫が移動することによる振動の両者を振動センサが計測していると考えられる。積雪層が無い場合から、徐々に積雪層厚が大きくなるに従い、これらの振動が積雪層に吸収され、結果として振動を検知しづらい状況になったものと考えられた。

次に、ローラ走行時の振動減衰を定量的に把握するため、統一的な指標により比較するために、常時

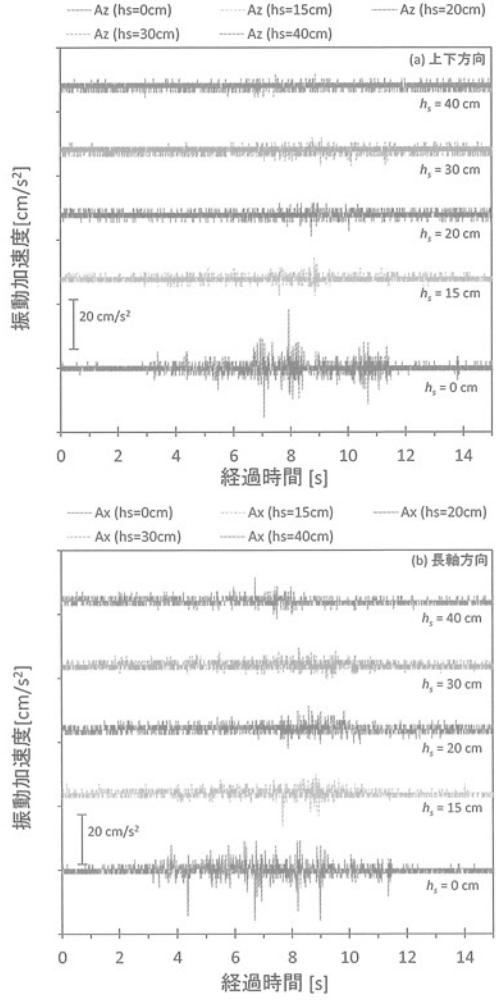


図-8 ローラ起振時の積雪厚毎の振動波形の比較 ((a): 上下方向, (b): 長軸方向)

微動と見なせる計測値より大きな加速度値を時間的に積算し、累積値を取ったものが図-9である。この累積値は速度の次元 [cm/s] を持つこととなる。ここでも、(a) : 上下方向、(b) : 長軸方向とした。図の(a)より、累積値は積雪層厚が大きくなるにつれて、減衰する傾向が確認された。同図の(b)においても、概ね単調に減衰する傾向が見られた。但し、(a)のケースにおいて積雪層厚 20 cm でやや回帰曲線よりやや大きな値を取っていることや、(a), (b)共通して層厚 20 cm 以上でごく小さな値を取っていることが読み取れる。従ってより大きな重量を持つローラを用いた追加実験等も必要となると考えられるが、少なくとも本稿の実験条件の設定範囲内においては、加速度波形は積雪層厚の増加に伴い顕著に減衰する傾向が見られた。本実験で想定しているのは積雪層上で発生する土砂移動という限られた条件の事象を扱っているのであるが、今後冬期間の土砂移動による振動検知に際しては、積雪層の存在により振動が減衰する可能性があることを留意すべきと考えられる。

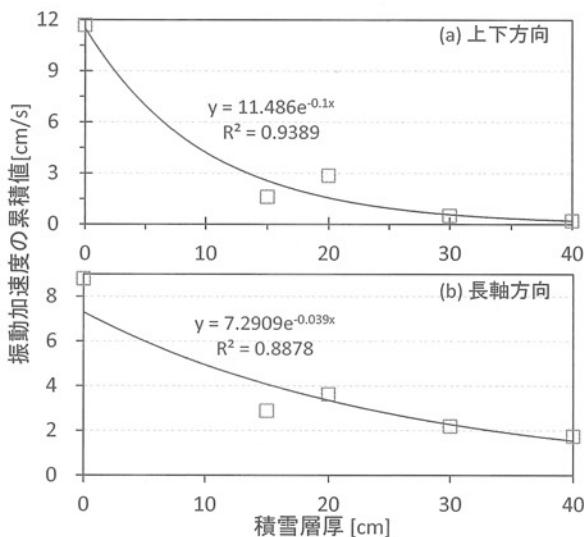


図-9 ローラ起振による振動加速度の累積値 ((a):上下方向, (b):長軸方向)

4.まとめ

本稿では、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。これには、泥流等の発生及び流下における現地測定の容易性を想定し、ノイズ分離は行わず検知波形をそのまま使用した。

実験結果から、積雪による波形振幅の減衰効果は、15 cm 程度の厚みでも大きいこと、一方、15 cm 程度の積雪厚であれば雪面上の土砂移動に関する振動検知の可能性があることが確認できた。また、同一のボウリング球落下高では、積雪厚が大きくなるほど振幅が減衰することがわかった。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。

一方、連続的な起振に関する実験では、ボウリング球起振時ほど明確な傾向は現れなかったものの、積雪厚の増加と共に振動振幅及び振動加速度の累積値は減衰する傾向が確認できた。

積雪が存在する場合、これまで土砂移動の検知事例及び振動減衰に関する知見は乏しかった。本稿から得られた知見は、積雪層を介した振動検知において検知基準を定量的に定めることに貢献する可能性を有している。また、本稿の知見により積雪層の減衰効果を適切に考慮した振動検知基準が設定されれば、積雪期の火山地域において、従来の検知基準よりも精度良く土砂移動を検知できる優位性を有すると考えられる。

今後は、現地スケールの土砂移動においても同様の

減衰傾向が見られるかどうかの実地検証を実施していくとともに、将来的には、火山泥流について石礫型や泥流型等流動状態の違い、積雪の融解状態及び積雪密度や空隙など雪質の変化に応じた振動特性の把握や、これらに対する振動検知式センサの適用範囲について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 旭川河川事務所：砂防事業が行われている地域の観光地, URL: http://www.as.hkd.mlit.go.jp/asriver/02jigyou/02sabou/k_tokachi.html (参照日 2014 年 5 月 9 日).
- 新谷融・清水収・西山泰弘：十勝岳火山山麓における火山泥流と土砂害の発生履歴に関する研究, 北海道大学農学部演習林研究報告, Vol.48 (1), 191-232, 1991.
- 南里智之・博林基弘・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, 新砂防, Vol.56, No.5, 33-44, 2004.
- 札幌管区気象台火山監視・情報センター：十勝岳の火山活動解説資料（平成 26 年 2 月）, URL: http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/14m02/108_14m02.pdf (2014/5/9 参照).
- 宮田秀介・堤大三・村重慧輝・宮本邦明・藤田正治：泥流発生過程を考慮した融雪型火山泥流の予測, 土木会論文集 B1(水工学), Vol.70, No. 4, I_940-I_954, 2014.
- 堤大三・藤田正治・宮田秀介・志田正雄・長野快：噴火による融雪型火山泥流の発生機構に関する基礎的検討, 京都大学防災研究所年報第 54 号 B, 593-601, 2011.
- 独立行政法人事木研究所土砂管理グループ火山・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），土木研究所資料第 3974 号, 2005.
- 独立行政法人事木研究所・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利用した土石流監視手法に関する共同研究報告書, 33-34, 2012.
- 疋田誠・榎並利征・酒谷幸彦・山根史郎・大山勉・会田和義・石塚浩一：地盤振動を利用した土石流のハイドログラフの推算, 土木学会西部支部第 1 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 5-8, 2002.
- 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.
- 栗原淳一・武澤永純・阪上最一・定村友史：地震時の大規模な土砂崩壊の土量と最大加速度との関係に関する考察, 砂防学会誌, Vol.60, No.5, 54-59, 2008.

(2014. 5. 9 受付)