

**河川砂防技術研究開発
【成果概要】**

①研究代表者		氏 名（ふりがな）		所 属		役 職	
		おお み し ろう 大 見 士 朗		京都大学 防災研究所		准教授	
②研究 テーマ	名称	焼岳火山地域における振動計ならびに傾斜計データの利用による質量移動検知システムの開発研究					
	政策 領域	[分野] 地域課題分野（砂防）		融合 技術	(リモートセンシング、非破壊 検査、認知行動学 等)		
		[公募課題]					
③研究経費（単位：万円）		平成 年度	平成 年度	平成 年度	総 合 計		
		170	110	114	394		
④研究者氏名							
氏 名			所属・役職（※平成28年3月31日現在）				
熊 谷 博 之			名古屋大学大学院環境学研究科・教授				
西 村 太 志			東北大学大学院理学研究科・教授				
⑤研究の目的・目標							
土石流や地すべりに代表される表層での質量移動の発生やその規模等を準リアルタイムで把握することは防災の初動体制の構築等の観点から重要である。最近、振動波形データや傾斜観測データの解析により、これらの情報を把握する技術が提案されており、手法の実用性の検証を種々の対象地域で行うことが課題となっている。そのため、本研究では飛騨山脈の焼岳火山を対象地域として、振動波形データを用いた土石流等の発生場所の同定の実時間解析、および傾斜計データの解析による移動質量の推定を試み、同手法の有効性および本対象地域での実用性の検証を行うことを目標とする。							

⑥研究成果

1. 本研究の背景および概要

土石流や地すべりに代表される表層での質量移動の発生やその規模等を準リアルタイムで把握することは防災の初動体制の構築等の観点から重要である。最近、振動波形データや傾斜観測データの解析により、これらの情報を把握する技術が提案されており、手法の実用性の検証を種々の対象地域で行うことが課題となっている。

そのような観点から、本研究では飛騨山脈の焼岳火山を対象地域として、振動波形データを用いた土石流等の発生場所の同定の実時間解析、および傾斜計データの解析による移動質量の推定を試み、同手法の有効性および本対象地域での実用性の検証を行うことを目標とする。ここでは、焼岳火山に設置された北陸地方整備局の数点のテレメータ地震観測点と、京都大学による地震（振動）観測点のデータを利用して、同地域で発生する土石流等の発生位置を準実時間で把握するシステムの構築を試みる。また、地盤の傾斜を測定する傾斜計を山体の適切な溪流沿いに設置し、土石流等に伴う傾斜変動から移動した質量の評価を行うことも併せて試みる。

山体に設置された計測機器による震動波形や地盤傾斜データを用いて、土石流や泥流が発生した位置やその移動経路、さらにはその質量を準実時間で監視することができれば、土砂災害等に対する防災対策として大変有用である。また、この手法は焼岳のような活火山においては火砕流等の火山活動の活発化時の事象にも対応可能であるため、遠隔地でこのような事象を監視できることの意義は大きい。さらに、この手法は、上記のような山体の表面での振動現象のみならず、火山体の中で発生する振動現象についても有効に機能する可能性がある。後者の例として、火山の低周波地震等、火山活動に関連すると考えられる地震現象があり、これらの実時間監視を可能にすることは火山活動の監視にも貢献することができると考えられる。

2. 調査・研究の年次計画

平成25年度の研究計画申請時点での年次計画は、以下のようなものであった。

2.1 平成25年度

(1) 焼岳山麓の現場での観測

(1-1) 振動観測 1

松本砂防事務所管轄の上高地峠沢の峠沢第6号床固近傍での、松本砂防事務所管轄の振動観測点を復活させる。これは、2010年まで京都大学防災研究所と共同で行っていたものであるが、担当者の定年退職に伴い、休止していたものである。

(1-2) 振動観測 2

京都大学が2010年より焼岳山麓で継続していたオフライン地震観測（振動計測）を継続する。初夏、盛夏、晩秋の冬季閉鎖前の3回程度、データ回収および機器の保守の作業を行う。

(1-3) 傾斜観測

同じく峠沢第6号床固近傍を対象地域として、傾斜観測を行うための機器の設置を行い、観測を開始する。2013年夏季から秋季にかけて機器の設置調整を行い、同地の冬季閉鎖前に一回目のデータ回収を行う。

(2) データ解析システムの構築

(2-1) 振動計データ解析システム

京都大学防災研究所本所（京都府宇治市）にデータ解析用の計算機を仮設置し、システム構築の作業を行う。なお、稼働後は、本システムは同附属地震予知研究センター上宝観測所（岐阜県高山市上宝町）に移設する。防災研究所本所および上宝観測所には、すでに、焼岳山麓の北陸地方整備局



Fig.1：焼岳火山周辺の振動（地震）観測点の分布。■は京都大学、■は神通川水系砂防事務所、■は気象庁の、それぞれオンライン観測点。■は京都大学のオフライン観測点であり、このうち、DP.KKHZとDP.TSIKの2点を、本研究開発でオンライン点に転換した。また、DP.KKHZには、気泡型傾斜計を併設した。

⑥研究成果（つづき）

管轄の震動計（地震計）データが、神通川水系砂防事務所よりリアルタイムで分岐されており、解析システムの構築・設置運用に好適である。ここに、Kumagai et al. (2009, 2010)のシステムを構築する。

(2-2) 傾斜計データ解析システム

解析ソフトウェアを開発する。

(3) データ解析

(3-1) 振動計データ解析

稼働の下準備のための予備的なデータ解析を行う。

(3-2) 傾斜計データ解析

当年度回収したデータを用い、稼働試験等を行う。

2.2 平成26年度

(1) 焼岳山麓の現場での観測の継続

(1-1) 振動観測 1

上高地峠沢の峠沢第6号床固近傍での振動観測および傾斜観測を継続する。前年同様、初夏、盛夏、晩秋の3回程度、データ回収と機器保守を行う。

(1-2) 振動観測 2

京都大学が2010年より焼岳山麓で継続していたオフライン地震観測（振動計測）を継続する。前年同様、初夏、盛夏、晩秋の冬季閉鎖前の3回程度、データ回収および機器の保守の作業を行う。

(1-3) 傾斜観測

上高地峠沢の峠沢第6号床固近傍での傾斜観測を継続する。振動データと同様、初夏、盛夏、晩秋の冬季閉鎖前の3回程度、データ回収および機器の保守の作業を行う。

(2) データ解析システムの構築

防災研究所本所でのシステム構築が完了後、上宝観測所に移設する。また、データ解析の結果を参照し、必要に応じて解析システムのチューニングを行う。

(3) データ解析

(3-1) 振動計データ解析

焼岳火山では、国交省北陸地方整備局による数点のテレメータ地震観測点と、前述のような京都大学による数点の地震観測点が設置運用されている。最初に双方のデータをマージしたオフラインデータに対して、本手法を適用し、パラメタのチューニングと手法の適用限界の評価を行う。この過程で、オフライン観測点を1～2点増設し、その効果の検証も行うことも検討する。次に、準リアルタイムで本システムを稼働させることを試み、解析のための各種パラメタのさらなるチューニングを行う。

(3-2) 傾斜計データ解析

回収したオフラインデータの解析を行い、傾斜観測データから移動質量を見積もることを試みる。



Plate.1 : 松本砂防事務所上高地防災情報センター敷地東端の既存の地震計台（上）と今回設置した地震計（下）.



Plate.2 : 松本砂防事務所峠沢第6号床固の上に設置されたオフライン観測点.

⑥研究成果（つづき）

2.3 平成27年度

(1) 焼岳山麓の現場での観測の継続

(1-1) 振動観測 1

上高地峠沢の峠沢第6号床固近傍での振動観測および傾斜観測を継続する。前年同様、初夏、盛夏、晩秋の3回程度、データ回収と機器保守を行う。

(1-2) 振動観測 2

京都大学が2010年より焼岳山麓で継続していたオフライン地震観測（振動計測）を継続する。前年同様、初夏、盛夏、晩秋の冬季閉鎖前の3回程度、データ回収および機器の保守の作業を行う。

(1-3) 傾斜観測

上高地峠沢の峠沢第6号床固近傍での傾斜観測を継続する。振動データと同様、初夏、盛夏、晩秋の冬季閉鎖前の3回程度、データ回収および機器の保守の作業を行う。

(2) データ解析システムの構築

データ解析の結果を参照し、必要に応じて解析システムのチューニングを行う。

(3) データ解析

(3-1) 振動計データ解析

引き続き、リアルタイムで本システムを稼働させる。

(3-2) 傾斜計データ解析

引き続き、回収したオフラインデータの解析を行う。

(4) システムの性能の評価

(4-1) 振動計データ解析結果の評価

現地調査に基づく土石流等の表面現象の記録等との照合や、山体内で発生する自然地震等を従来の手法で解析した結果との比較検討に基づき、本システムの性能の評価を行う。

(4-2) 傾斜計データ解析結果の評価

本解析による結果と松本砂防事務所が設置予定の土石流の質量観測装置のデータとの比較検討を行う。

3. 焼岳山麓での観測実施状況

3.1 振動計（地震計）での観測実施状況

Fig.1に対象地域の微小地震観測点（振動観測点）の分布を示す。ここには、主に岐阜県側に、京都大学、気象庁、（独）防災科学技術研究所、北陸地方整備局神通川水系砂防事務所のテレメータ観測点がFig.1の外の点も含め合計8点展開されており、それらのデータは京都大学防災研究所へ集約されている。そのほかに、京都大学によるオフライン観測点が長野県側も含め7点展開されている。

本研究開発においては、準実時間でのデータ処理を必要とすることから、リアルタイムデータを取得できるテレメータ方式の観測点が必須である。そのため、北陸地方整備局松本砂防事務所のご協力を得て、上高地地内に2点のテレメータ観測点を新規に整備することを計画した。ここでは、Fig.1に示す、DP.TSIKとDP.KKHZの2点の整備について記述する。

DP.TSIKは、松本砂防事務所上高地防災情報センター敷地内に設置された観測点である。同センター敷地の東端に、1990年代半ばに設置されたものと思われる地震計設置台があり（Plate.1）、この台上に地震計を設置させていただいた。地震計はサーセル社製の固有周期



Plate.3：峠沢観測施設敷地に新たに設置した機器ピット。（上）上流側から機器ピットおよび峠沢観測室を望む。（下）ピット内の機器設置状況。左上：強震計，左下：3成分高感度地震計，右上：気泡型傾斜計。

⑥研究成果（つづき）

1Hzの高感度3成分地震計L4C-3D型である。ここから、敷設済みであった既存の信号ケーブルを利用して防炎情報センター無線室内にデータを導き、白山工業株式会社製データレコーダLS7000XT型により、24bit、100Hzの分解能でデジタル化した。地震計の設置は2011年6月であり、爾来オフライン観測を続けていたが、2015年5月に後述のDP.KKHZ観測点のデータとともに、NTT Docomoの通信回線を使用して京都府宇治市の京都大学防災研究所までリアルタイムでデータを伝送するシステムを構築した。

DP.KKHZは、同じく松本砂防事務所所管の、峠沢土石流観測施設敷地内に構築したものである。ここでは、同敷地の利用をお許しいただいた上で2010年10月よりオフライン地震観測を実施中であったが（Plate.2）、土石流観測用の諸設備が充実していることから、ここに地震計および傾斜計のオンラインテレメータ観測点を設置することとした。ここに70cm×70cm×70cmのピットを作成し、地震計として、DP.TSIKと同じ短周期高感度地震計ならびに強震計、さらに気泡型の傾斜計を設置した（Plate.3）。強震計は、2009年までの、京都大学防災研究所と松本砂防事務所の間の別の共同研究によって使用されていたものを再利用したものである。データは、観測施設建屋まで新規敷設のケーブルで取り込み、室内に設置したデータレコーダにてデジタル化を行っている。その後、データは、本施設から上高地防災情報センターの間に敷設してある光ファイバー通信網を借用し、これを通じて上高地防災情報センターへ集約し、ここからDP.TSIKのデータとともに、京都へ伝送されている。

当初、DP.KKHZの設置作業は本計画の第1年目の平成25年度に実施の予定であったが、自然公園法（環境省）および文化財保護法（文化庁）の手続きが完了せず、平成25年11月中旬の上高地閉山までに作業に着手することができなかった。そのため、第2年目の平成26年度に各種許可手続を行い、許可日時の関係から年度内にピットの作成までを終了し、機器の設置調整は平成27年度初夏にずれ込むこととなった。最終的に、平成27年5月に機器の設置調整が終了し、オンラインテレメータ観測を開始することができた。Fig.2に、DP.TSIKならびにDP.KKHZ観測点で取得された地震波形の例を示す。

3.2 傾斜計での観測実施状況

土石流等による質量移動に伴う地盤の傾斜変動を捉えるために、Fig.1に示す微小地震観測点のうち、松本砂防事務所所管の、峠沢土石流観測施設敷地内に傾斜計を設置した。同観測施設には、松本砂防事務所によって河道内に土石流の質量を計測する荷重計が設置される予定であるため、実際に計測した質量と、傾斜変動から求められる質量を比較検討することを目指したものである。

傾斜計はJewell Instruments社のModel 701-2型気泡式傾斜計を使用し、地震計を設置したピット内に併設した。データは地震計のそれと同様、観測施設建屋まで取り込んだ後に室内に設置したデータレコーダにてデジタル化を行い、上高地防災情報センターから京都に伝送している。

4. データ解析手法の概要

4.1 振動計（地震計）データ利用による振動源位置の推定手法

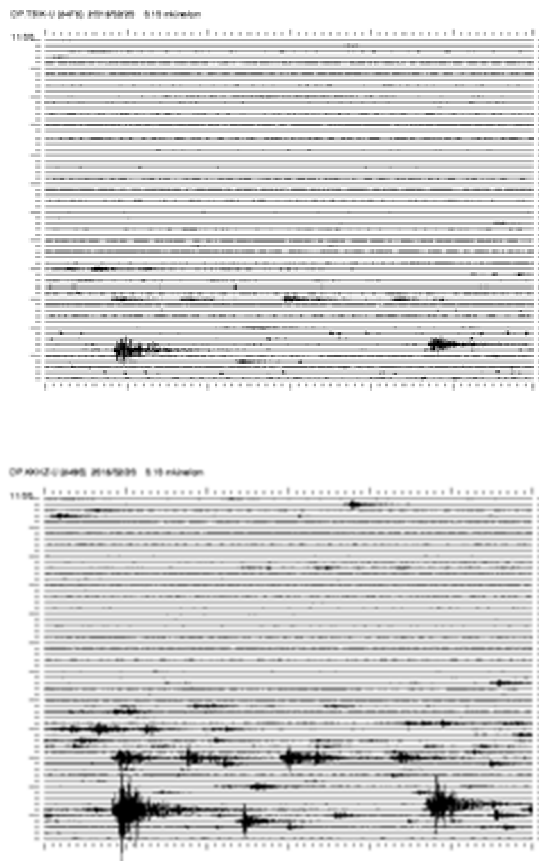


Fig.2 : (a:upper) DP.TSIK 観測点での観測波形例。2016年2月20日11時台の上高地近郊の小規模な群発地震の例。(b:lower) DP.KKHZ 観測点での観測波形例。Fig.2(a)と同じく、2016年2月20日11時台の上高地近郊の小規模な群発地震の例。両観測点とも、特に渇水期には良好な記録を取得することができる。

⑥研究成果（つづき）

ここでは、Kumagai et al. (2009)の方法を踏襲して、振動波形から振動源の位置を求めるを試みる。

ある振動源 x_s で時刻 t_s に励起された地震波を j 番目の観測点 x で時刻 t に観測した振幅 A_j は

$$A_j(x, t+r/\beta) = A_0(x_s) \frac{e^{-Br}}{\sqrt{r}} \delta(t-t_s) \cdots (1)$$

で表される。

ここで、振動源は地表にあり、主たる波は伝播速度 β の表面波で伝わりとする。 r は振動源と観測点の距離、 A_0 は振動源での振幅である。なお、震源時間関数はインパルス仮定している。また、 e^{-Br} および $\sqrt{r}$ は、それぞれ、内部減衰と幾何減衰による振幅の減衰を表しており、 $B = \pi f/Q\beta$ である。ここで、 f は着目している周波数、 Q はその周波数での減衰定数を表す。これに基づき、理論振幅と観測振幅の残差二乗和が最小になる振動源の位置をグリッドサーチにより探索する。すなわち、

$$R = \frac{\sum_{j=1}^N \{A_j^o(x, t_s+r/\beta) - A_j^c(x, t_s+r/\beta)\}^2}{\sum_{j=1}^N \{A_j^o(x, t_s+r/\beta)\}^2} \cdots (2)$$

で表される量 R を最小にする x を求める。

A^o および A^c は、それぞれ観測振幅および理論振幅を、また、 N は観測点数を表す。なお、各観測点での観測振幅は各点のサイト増幅特性に影響されるため、あらかじめ、自然地震のコーダ振幅を用いて A_j^o を補正するための係数を求めておく。

4.2 傾斜計データ利用による移動質量の推定

半無限弾性地盤に点荷重を置いた場合の地盤の変形を求める問題は、ブジネスク問題として知られる。点荷重のかわりに、半径 a の領域に荷重をかけた際の変形の解析解は以下のように求められる（西村、私信）。ここでは、以下のような荷重をかけた場合を考える。

$$P(r) = \begin{cases} P_0 \sqrt{1-(r/a)^2} & 0 \leq r \leq a \\ 0 & a < r \end{cases} \cdots (3)$$

ここで、 a は荷重領域の半径、 r は荷重中心からの距離、 P_0 は荷重である。このとき、地盤の、動径方向の変位 $u_r(r)$ および鉛直方向の変位 $u_z(r)$ 、ならびに動径方向の傾斜 γ は以下のように表すことができる。

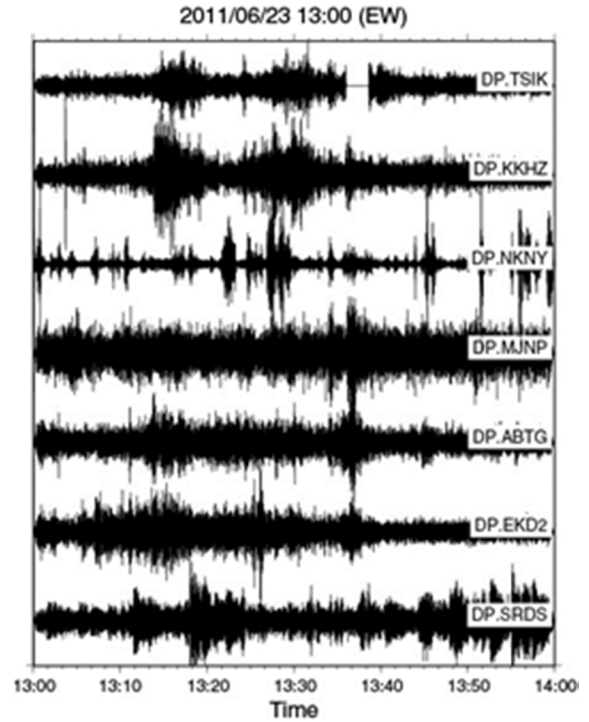


Fig.3 : 2011 年 6 月 23 日の上高地産屋沢の土石流が発生した時刻前後の上高地周辺の振動観測点の原記録。13 時から 14 時までの 1 時間の東西成分の連続記録を示す。

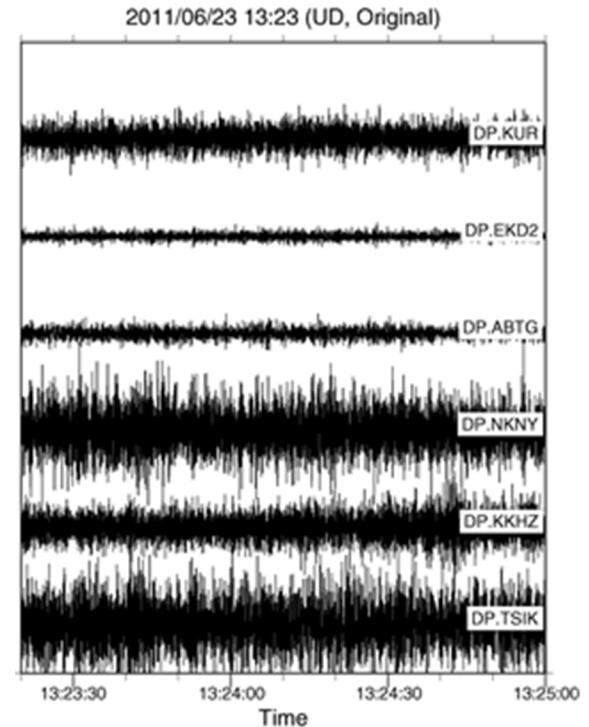


Fig.4 : (a) 解析に用いた波形記録の例。観測点位置は Fig.1 参照。50Hz サンプルングの上下動成分の、観測された原波形を示す。

⑥研究成果（つづき）

$$u_r(r) = -\frac{1-\alpha}{2\alpha} \frac{P_0 a}{\mu} \frac{a}{3r} \dots (4)$$

$$u_z(r) = -\frac{1}{2\alpha} \frac{P_0 a}{\mu} \frac{r}{4a} \times \left[\sqrt{1-(a/r)^2} - (1-2(a/r)^2)(r/a) \sin^{-1}(a/r) \right] \dots (5)$$

$$\gamma = \frac{\partial u_z(r)}{\partial r} \dots (6)$$

ただし、 μ は剛性率であり、

$$\alpha = 1 - (V_s / V_p)^2 \square 2/3$$

である。

実際の土石流においては、荷重は河道に沿う線状の領域に分布することが予想されるので、その場合は、(4)および(5)式をある線上で積分した結果の変位量を理論値として観測データと比較することとなる。

5. データの試験的な解析

5.1 振動計（地震計）データの試験解析

(1) 解析に用いた事象の概要

上高地防災情報センター設置のDP.TSIK観測点ならびに峠沢土石流観測施設設置のDP.KKHZ観測点がオンライン化された2015（平成27）年5月以降、上高地地内では大規模な土石流の発生がなく、リアルタイムでの土石流発生時のデータを取得することはできなかった。そのため、ここでは、同地域での振動観測（地震観測）がオフライン方式であった2011（平成23）年6月に上高地産屋沢で土石流が発生した際に取得されたデータを用いて試験解析を行い、手法の有効性の確認を行った。

この土石流は、福島・他(2012)の報告によれば、2011（平成23）年6月23日13時30分ごろ、長野県松本市安曇上高地地先の産屋沢と尾根を挟んだワラビ沢の双方において相次いで土石流が発生し、県道上高地公園線およびこの県道と接続する一般国道158号が寸断され、上高地地内にバス21台と観光客約860人およびホテル従業員等役400人の計約1260人が孤立するなどしたものである。現場となった県道上高地公園線の産屋沢橋は、釜トンネルの上高地側出口から数十メートル上流側の場所に位置している。

(2) 取得された振動計（地震計）データ

産屋沢の土石流の発生前後に上高地地内および周辺で稼動していた振動計（地震計）観測点はFig.1のとおりである。これらの観測点には、すべて固有周期1Hzの高感度地震計が設置してある。これらの観測点における観測波形を並べて示した例をFig.3に示す。これは、13時から14時までの1時間の各点で得られた水平動成分（東西成分）の50Hzサンプリングの連続記録である。この原記録では、たとえば13:15付近や13:35付近に複数観測点で振幅が大きくなるような時間帯が見られる。なお、Fig.3にはFig.1の外部にある観測点の記録も含まれている。

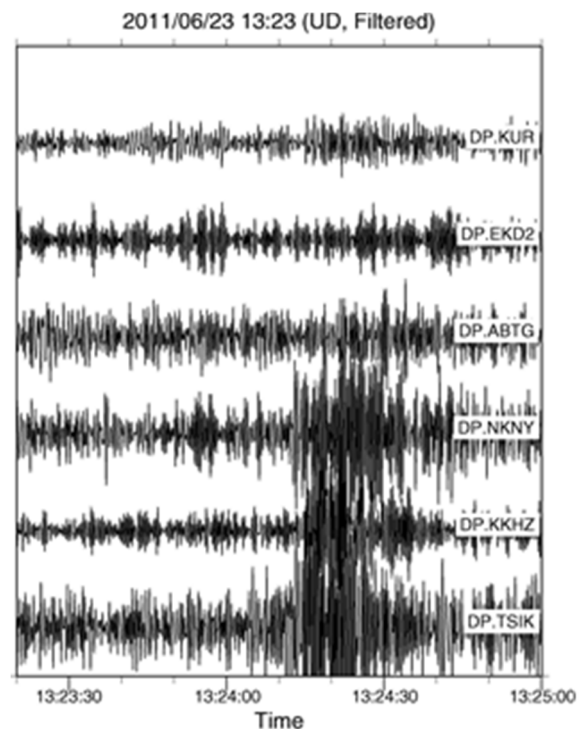


Fig.4 : (b)Fig.4(a)に示す原記録に1Hz～3Hzのバンドパスフィルタを施した記録。

⑥研究成果（つづき）

(3) 振動波形データの前処理

ここでは、取得された記録のなかから、Fig.4に示す6観測点の上下動記録を解析に使用した。ここにはその中から13:23:20から13:25:00の記録を示す。Fig.4(a)に示した原記録に、信号を強調するために帯域が1Hzから3Hzまでのバンドパスフィルタを施したものをFig.4(b)に示す。すなわち、Fig.4(a)およびFig.4(b)は、バンドパスフィルタを施す前後の記録である。これにより、Fig.4(a)の原記録では識別が困難であった、複数観測点で共通に見られる信号が13:24:00から13:25:00の時間帯に抽出されていることがわかる。さらに、この波形の包絡線波形（envelope波形）を作成し、5secの移動平均を取った上で、サンプリングレートを原波形の50Hzから1Hzに変換したものがFig.4(c)である。これらの処理を施すことで原波形ではみられなかったパルス状の信号がDP.TSIK、DP.KKHZにDP.NKNYなどの各点に明瞭に認められるようになってきている。

(4) サイト増幅特性の推定

同じく4.1節で示したように、本手法では各観測点の振動波形の振幅を用いて振動源の位置を推定することから、各観測点での観測振幅は各点のサイト増幅特性に影響される。そのため、あらかじめ、自然地震のコード振幅を用いて観測振幅を補正するための係数を求めておくことが必要となる。ここでは、2011年6月30日に長野県中部で発生したM2.5の自然地震を使って振幅補正の係数を求めた。観測された自然地震のS波コード部分のうち、S波走時の2倍以降の部分の振幅は震源や伝播経路には依存せず、観測点の増幅特性のみを反映すると考えられている（Aki& Chouet, 1975）。使用した6観測点の自然地震記録の上下動成分に1Hzから3Hzのバンドパスフィルタを施し、S波走時の2倍部分から10秒間の包絡線記録を作成し、その最大振幅を使用してコード増幅特性を求めた。Table.1に、DP.KKHZのコード振幅で規格化した際の、各観測点のサイト増幅特性を示す。

Station Code	Amp. Factor
DP.KKHZ	1.000
DP.ABTG	0.670
DP.EKD2	3.667
DP.KUR	0.336
DP.NKNY	0.533
DP.TSIK	0.076

Table.1：2011年6月30日の長野県中部で発生した地震(M2.5)の上下動成分から求めた、サイト増幅特性。DP.KKHZの値で規格化している。

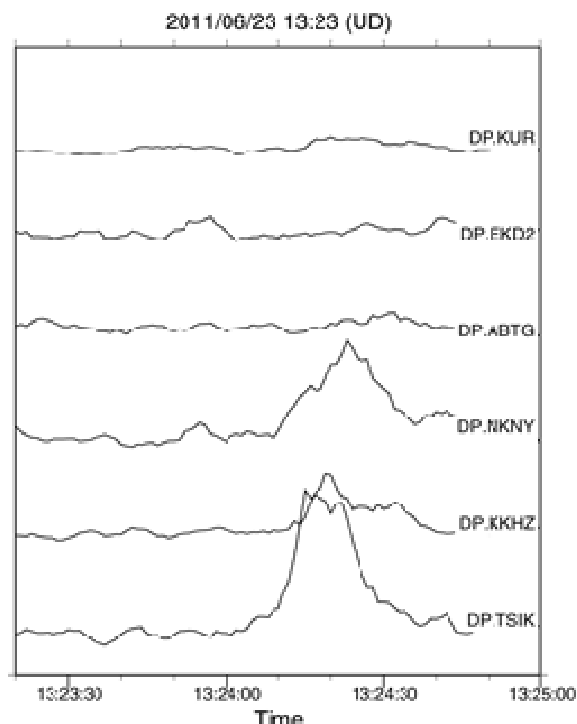


Fig.4：(c) Fig.4(b)の記録の包絡線波形を作成し、5secの移動平均をとった波形。解析の際には、この波形のサンプリングレートを原波形の50Hzから1Hzにダウンサンプリングして使用する。

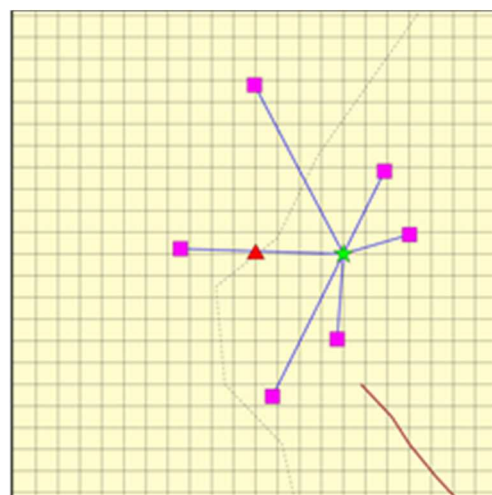


Fig.5：解析領域の格子点配置。焼岳（▲）を中心として10km×10kmの領域に40m間隔の格子点を配置した。ある格子点（★）に振動源（インパルス波形を仮定）を置いた場合の各観測点（■）での理論波形は格子点と観測点の距離 r および波の伝播速度 β から求められる。

⑥研究成果 (つづき)

(5) 振動源位置の推定

Fig.4(c)に示した波形データを用いて、4.1節で示した、(2)式の R を最小にする条件で振動源の位置と時刻を求める。解析領域として、Fig.5に示すような焼岳を中心とする10km×10kmの範囲に40m間隔の格子点を配置した。各時刻ごとに、各格子点に振動源をおいた際の R を計算し、 R が一定の閾値以下になる時刻・格子点の位置を振動源の位置および時刻とした。解析に使用するパラメタは火山地域の一般的な値として次のものを用いた。

地震波伝播速度： $\beta=1000\text{m/s}$ ；減衰定数 $Q=50$ ；
使用中心周波数 $f=2\text{Hz}$ 。

(6) 結果

ここでは、いくつかの時間帯の解析結果をFig.6からFig.8に示す。Fig.6は13:23:20～13:25:00の結果、Fig.7は13:36:00～13:37:40までの結果、Fig.8は13:12:30～13:15:50までの結果を示す。

Fig.6(a)に示す13:23:20～13:25:00の振動波形記録には、DP.TSIK、DP.KKHZ、DP.NKNYなどに大きな信号が見られる。なお、これらの振幅は、サイト増幅特性を補正した後のものである。この記録を用いて振動源を求めた結果がFig.6(b)である。(2)式の R が一定の閾値以下になった際に振動源が求められたと考え、☆印でその時刻(Fig.6(a))および位置(Fig.6(b))を示している。これによると、13:24ごろに大きな振動波形が観測されており、振動源はDP.TSIKの南南西0.5km～1kmの位置に求まっている。福島・他(2012)の報告では、土石流の第一波が観測されたのは13:30ごろとされているので、これとは数分の差があり、振動計が捉えた信号が、13:30ごろに土石流が産屋沢で県道上高地公園線上に溢れた時刻に相当するののか、それともそれ以前のなんらかの現象を捉えているのかは今後の検討が必要である。

Fig.7(a)に示す13:36ごろの記録にも明瞭な振動波形が見られる。この時刻は福島・他(2012)によれば土石流の第2波が発生した時間帯に近い。DP.KKHZ(峠沢)での振動波形をDP.ABTG(安房峠)のそれと比べると、13:24の波形ではDP.KKHZでの波形の振幅が大きいのにに対し、13:36の波形では逆にDP.ABTGでの波形の振幅が大きい。そのため、13:36の振動源は、13:24のそれよりもDP.ABTGに近い側、すなわち下流側または南西側に位置するのではと思われる、実際に振動源が南西側に求められている。しかし、その直前に、DP.TSIKでは停電が発生したため記録がとれていないことから、13:24の振動波形と同条件での振動源の位置の比較ができないことは惜しまれる。ちなみに13:36の振動源はDP.NKNY(国道158号旧道焼岳登山口)付近に求まっている(Fig.7(b))。

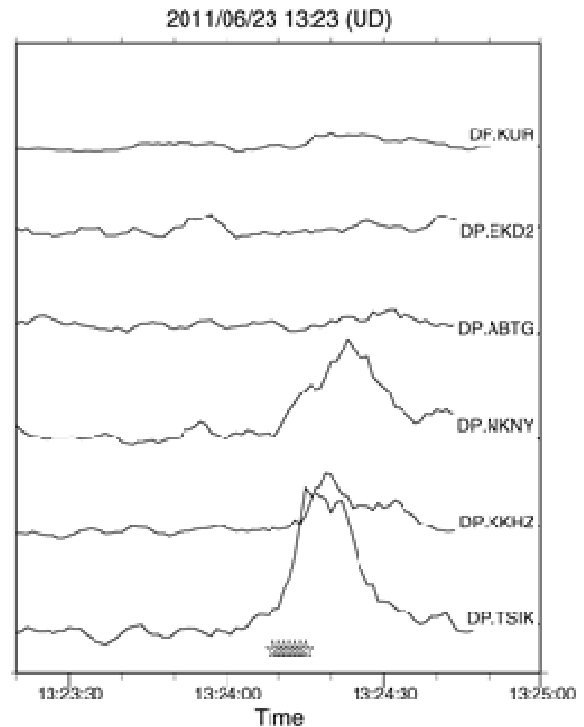


Fig.6 : (a) 13 時 23 分 20 秒から 13 時 25 分 00 秒までの前処理後の振動波形。DP.TSIK、DP.KKHZ、DP.NKNY など明瞭なピークを持つ。☆は、振動源位置推定残差が閾値以下であった時刻を示す。

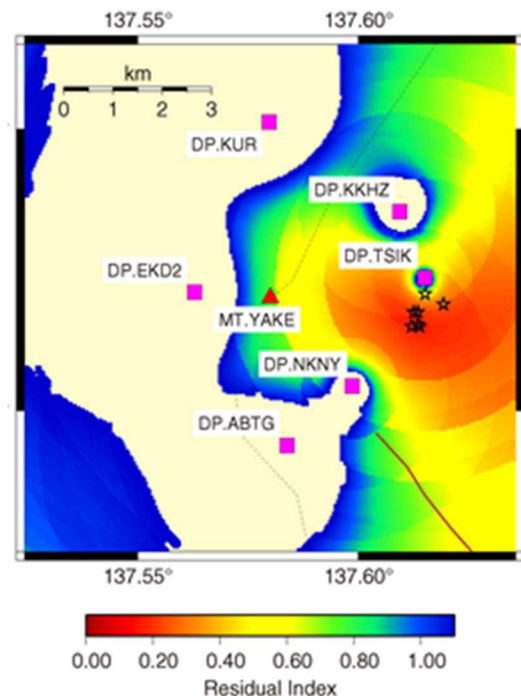


Fig.6 : (b) Fig.6(a)の時間範囲で推定された振動源の位置。推定誤差は相対的に小さい。振動源は DP.TSIK の南、産屋沢付近に求まる。☆は振動源位置推定残差が閾値以下であった位置を示しており、Fig.6(a)の☆を付した時刻に対応している。

⑥研究成果（つづき）

Fig.6(a)やFig.7(a)の振動波形は、立ち上がり時間が10sから20s程度と比較的短く、明瞭なパルス型を呈している。これに対して、Fig.8(a)に示す13:15付近の記録は、振幅の立ち上がりが緩やかであり、パルス形状は明瞭でない。福島・他(2011)によると、13:10前後は10分間雨量のピーク時にあたっていることから、急速に観測点周辺の溪流の流量が増加したことを捉えているものと考えられる。この波形に対して振動源を求めたFig.8(b)によれば、振動源はDP.TSIKの西方の下堀沢付近に求められるが残差はFig.6やFig.7のケースに比較して大きく、信頼性は必ずしも大きくない。これは、土石流のような突発的に大きな質量が動く事象ではなく、むしろ、梓川本川や峠沢などの各沢の急激な増水に伴う振動を捉えているのではないと思われる。

5.2 傾斜計データの試験解析

前述のように、峠沢観測施設（DP.KKHZ）において傾斜計を設置して観測を行っている。しかしながら、設置後の2016（平成28）年3月までの観測期間中に土石流の発生は無く、有意なデータは取得できておらず、解析を行うことはできなかった。また、松本砂防事務所による峠沢観測施設への土石流荷重計の設置・データ取得開始も2015(平成27)年9月となり、出水期を終えた時期であったため、2016(平成28)年3月末までには土石流等に伴うデータは取得できていないと伺っている。そのため、残念ながら、研究開発期間内には傾斜計による土石流データ取得ならびに土石流荷重計データとの比較を行うことはできなかった。傾斜計は今後も観測を続けるため、実際のデータが取得された際にあらためて解析を試みたい。

6. まとめと今後の課題

振動計データを使用して上高地地内に発生する土石流等の発生場所と時刻を捉えるシステムの構築を試みた。

準実時間で解析を行うことを目標とし、上高地地内で従前より運用していたオフライン振動（地震）観測点のうち、松本砂防事務所上高地防災情報センターと同峠沢土石流観測施設の観測点をオンライン化する作業を行った。

解析手法の有効性の確認のため、上記2点がオフライン観測点であった時期である2011年6月に発生した上高地産屋沢の土石流による振動計データの試験的な解析をおこなった。その結果、本手法により現象の発生位置・時刻とも推定が可能であることがわかった。現在は、表面波伝播速度、媒質の減衰定数等は、火山地域で一般的な値を使用しているが、地震学的な別途手段を使用してこれらのパラメタの値を改訂することも結果の精度向上に資する

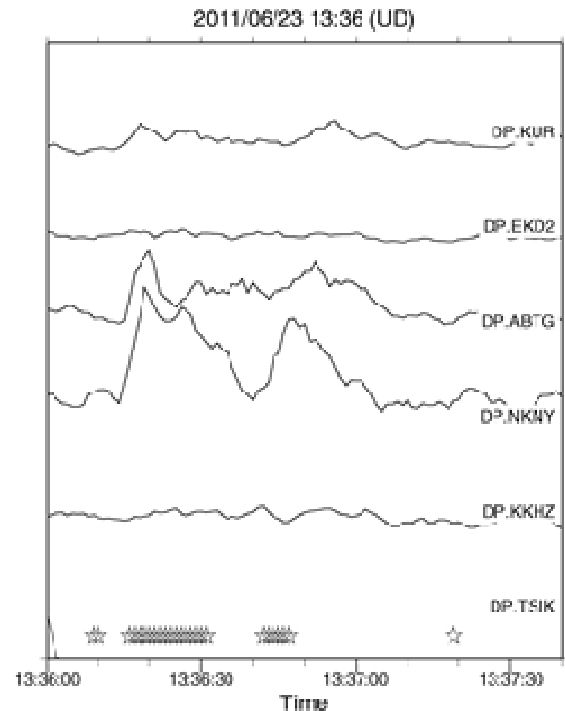


Fig.7 : (a) 13時36分00秒から13時37分40秒までの前処理後の振動波形。DP.ABTZ、DP.NKNYなどで明瞭なピークを持つ。DP.TSIKは直前の停電のためデータは欠測している。☆は、振動源位置推定残差が閾値以下であった時刻を示す。

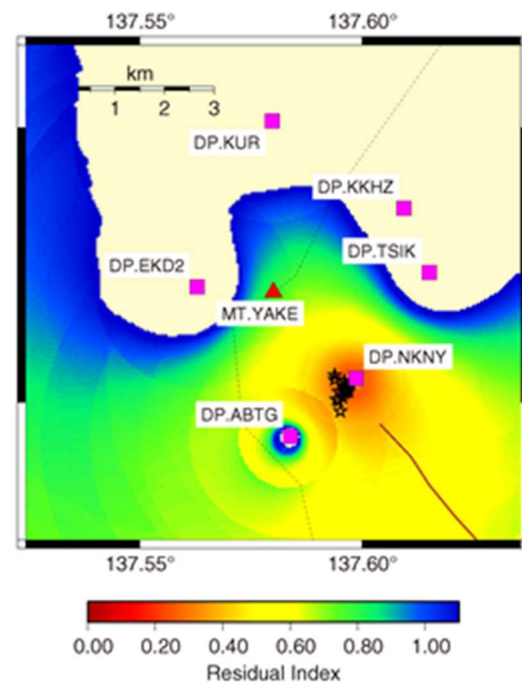


Fig.7 : (b) Fig.7(a)の時間範囲で推定された振動源の位置。推定誤差は相対的に小さい。振動源はDP.NKNYの近傍に求まる。☆は振動源位置推定残差が閾値以下であった位置を示しており、Fig.7(a)の☆を付した時刻に対応している。

⑥研究成果（つづき）

ものと考えられ、今後の課題である。研究期間中に実施したオンライン観測点の整備により、準実時間での現象の把握も可能となったと考えられるが、それらの稼動開始後に十分な規模の土石流が発生していない。研究開発終了後もシステムは継続して運用するため、引き続き、検証を行っていく。

傾斜計データを用いて移動質量を推定する試みについては、傾斜計稼動開始後に必要十分な規模の土石流が発生しなかったため、検証可能なデータを取得することができなかった。また、松本砂防事務所が運用する峠沢観測施設に併設された土石流荷重計についても、稼動開始後に土石流が発生していないため、2016(平成28)年3月末現在有効なデータを取得できておらず、実測質量と傾斜計から推定した質量の比較等はできなかった。こちらも今後の課題としたい。

謝 辞

国交省北陸地方整備局松本砂防事務所の皆様には、本研究開発の立案段階から種々のアドバイス、ご支援、ご協力をいただきました。研究開発開始後は、上高地防災情報センターや峠沢土石流観測施設敷地等に新規の観測設備を設置することをご快諾いただき、設置工事その他に関する全面的なご支援をいただきました。篤くお礼を申し上げます。同じく、国交省北陸地方整備局神通川水系砂防事務所の皆様にも、同事務所が管轄する岐阜県側の振動計観測点のデータ利用をご快諾いただいたほか、本研究にかかる側面からのご支援を多々いただきました。併せてお礼を申し上げます。

参考文献

- 福島将史・青地 仁・古山利也 (2012) : H23.6.23 上高地産屋沢における土石流の発生と応急対策について、北陸地方整備局。
- Aki, K. and Chouet, B. (1975): Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects, J. Geophys. Res., Vol.80, pp. 3322-3342.
- Kumagai, H., Palacios, P., Maeda, T., Castillo, D. B., and Nakano, M. (2009): Seismic tracking of lahars using tremor signals, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 183, pp. 112-121.
- Kumagai, H., Nakano, M., Maeda, T., Yepes, H., Palacios, P., Ruiz, M., Arrais, S., Vaca, M., Molina, I., and Yamashina, T., (2010): Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches, J. Geophys. Res., Vol. 115, doi:10.1029/2009JB006889.

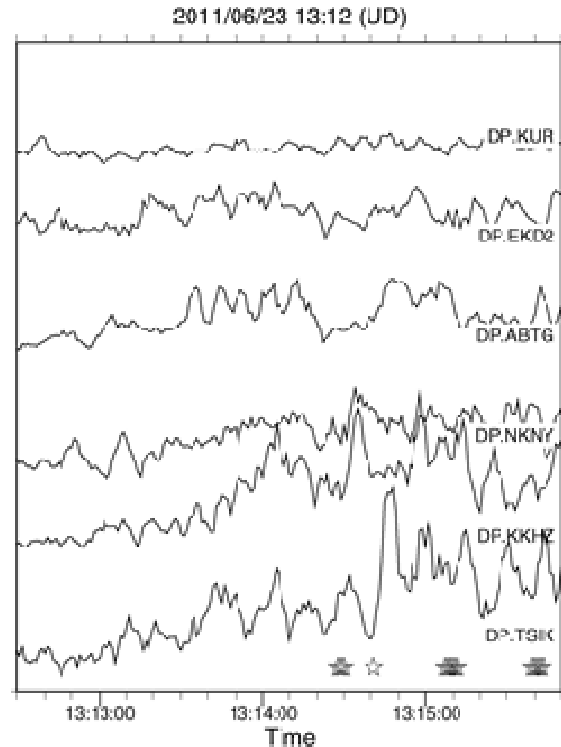


Fig.8 : (a) 13 時 12 分 30 秒から 13 時 15 分 50 秒までの前処理後の振動波形。明瞭なパルス状の信号は見え、全体的になだらかに振幅が増加している。☆は、振動源位置推定残差が閾値以下であった時刻を示す。

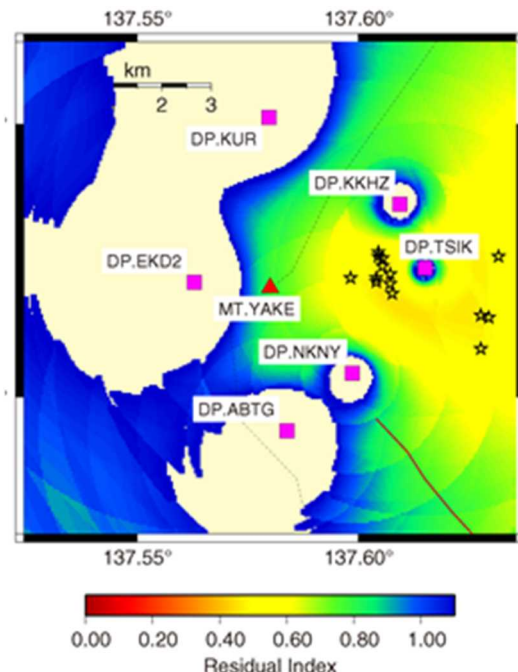


Fig.8 : (b) Fig.8(a)の時間範囲内で推定された振動源の位置。推定誤差は相対的に大きく信頼度は Fig.6 や Fig.7 の場合に比べて小さい。☆は振動源位置推定残差が閾値以下であった位置を示しており、Fig.8(a)の☆を付した時刻に対応している。

⑦研究成果の発表状況

大見士朗(2016): 焼岳火山地域における地動データの利用による土石流等発生位置の決定、京都大学防災研究所年報、投稿中.

⑧研究成果の社会への情報発信

なし

⑨表彰、受領歴

該当なし

⑩研究の今後の課題・展望等

研究期間中に必要十分なデータを取得するための土石流等が発生しなかったため、予定していた目標のうちの一部を達成することができなかったのが残念な点である。当初研究目標に掲げた2つの目標のうち、振動計データを用いて土石流の発生位置・時刻を推定する試みは、従前より継続していたオフライン振動観測により実データが取得されていたためその試験データの解析により手法が有効であることが確かめられた。また、事象発生後に準実時間で解析を行うために従前より運用中のオフライン点のうちの上高地側の2点をオンライン化したが、その後の諸事情によりさらに3点のオンライン観測点を構築しつつありこれらをすべて利用することで解析の精度が向上することが期待される。本研究期間中には地動データで明瞭な信号を捉えられるような規模の土石流は発生していないことから、松本砂防事務所のご協力を仰いで今後も観測を継続し、引き続きシステムの検証と改良を図っていきたい。また、傾斜計による質量推定の試みについては、機器の設置後に土石流等の事象が発生しなかったため実データを取得できず目標を達成できなかった。そのため、今後も同様に、観測と手法の開発・検証を続けていきたい。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

飛騨山脈等の深い山岳地域を管轄地域に持つ砂防事務所にとって、アプローチに困難を要する溪流等での土砂災害発生の監視と迅速な把握を行うことは、重要であるにもかかわらず必ずしも容易でないことが予想される。現状では、それぞれの溪流等に監視カメラやワイヤーセンサー等のハード的な対策を施すことによって土石流等の監視を行っているものと想像するが、本研究で試験を行った振動計データによる土砂移動監視手法の場合、必ずしも対象溪流沿いにセンサー（振動計）を設置していなくても、広域に展開されたセンサー群（振動計）により現象を捉えることができる可能性がある。これによる情報は、各溪流に設置されたセンサー群に比較するとその確度は低くなることも予想されるが、既存の監視システムに加え、本研究のような別種のデータの解析による情報を加えることで監視システムがよりロバストになることが期待される。