

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

Relocation of Debris Flow around the Yake-dake Volcano and Kamikochi Area, Central Japan, Using Ground Motion Data Recorded by Seismometers

大見士朗

Shiro OHMI

Synopsis

We demonstrated to determine the location and origin time of the debris flow using the ground motion data recorded with short period seismometers around the Yake-dake volcano and Kamikochi area, central Nagano prefecture, Japan. Seismic waves radiated from the debris flow are assumed as the surface wave and their location and origin time are determined so that RMS of the difference between theoretical and observed amplitude of the seismic signal are minimized by grid search method. We applied this procedure to the ground motion data of the debris flow that occurred near Ubuya-sawa valley, Kamikochi area in June 23, 2011 and could determine the location and time which well coincide with other filed investigations. We suppose this method can be one of the powerful tools to determine the location and the origin time of the mass movement phenomenon such as not only debris flow but also pyroclastic flow around the volcanoes.

キーワード: 土石流, 位置決定, 地動データ, 焼岳火山, 上高地

Keywords: debris flow, relocation, ground motion data, Yake-dake volcano, Kamikochi

1. はじめに

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、地震計によって得られる地動波形データ等の解析により、これらの情報を把握する技術が提案されており（たとえば、Kumagai et al., 2009, 2010）、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、地動波形データを用いた土石流等の発生場所および時刻の決定を試み、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。

山体に設置された計測機器による地動波形を用いて、土石流や泥流が発生した位置やその移動経路等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。

本報告では、岐阜・長野県境の飛騨山脈南部に位置する焼岳火山に設置された国土交通省北陸地方整備局の数点のオンライン地震観測点と、京都大学によるオンラインおよびオフラインの地震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と時刻を把握するシステムを構築し、その有用性を調べた。

2. 焼岳火山山麓での観測実施状況

Fig.1に対象地域の微小地震観測点の分布を示す。焼岳火山周辺には、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。

本報告で提案したシステムを実際に運用するためには、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が、上述のように長野県側にはオフライン観測点のみが運用されている。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、長野県側の上高地地内に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点の整備について概要を記載する。

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させていただいて防災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

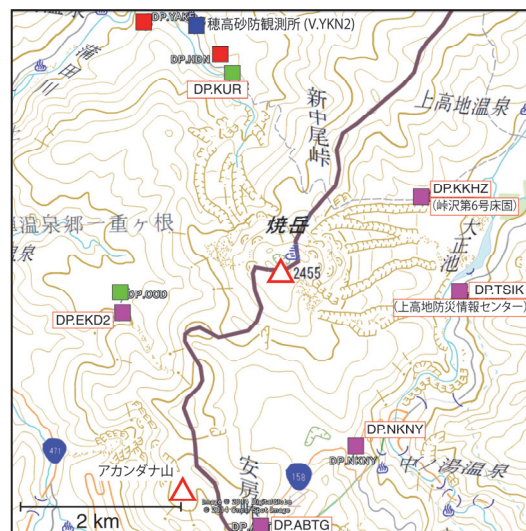


Fig.1 : Distribution of high sensitivity seismic stations. Red, green, and blue squares represent online stations operated by Kyoto Univ., Jindur River System Sabo Office (MLIT), and Japan Meteorological Agency (JMA), respectively. Magenta squares show the offline stations operated by Kyoto Univ.



Plate 1: Seismic observation site in the Kamikochi Disaster Prevention Information Center operated by Matsumoto Sabo Office (MLIT) (upper) and Sercel L4C-3D type seismometer installed at the site (lower).

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イズを行っている．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．これらの2点のオンライン化が完了したのは平成27年5月であった．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. 地動データ利用による振動源位置の推定手法の概要

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を仮定している．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，



Plate 2 : An offline seismic station installed on the Togesawa No.6 Sabo Dam.



Plate 3 : Newly installed instruments at the Togesawa observation site. (upper) View of the instruments pit. (lower) Instruments in the pit. High sensitivity short period seismometer (lower left), strong motion seismometer (upper left), and tiltmeter (upper right) are installed.

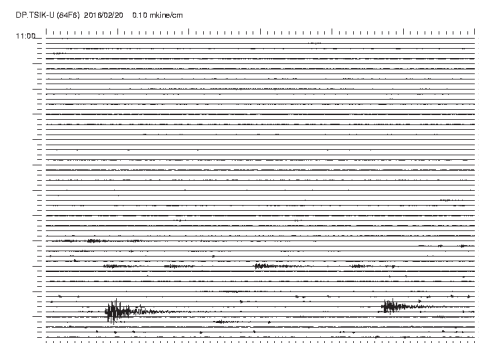


Fig.2 : (a) Example of seismic waveform at station DP.TSIK. Small swarm activity near Kamikochi area took place on Feb. 20, 2016 is observed.

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

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. データの試験的な解析

4.1 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。

4.2 取得された地動データ

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

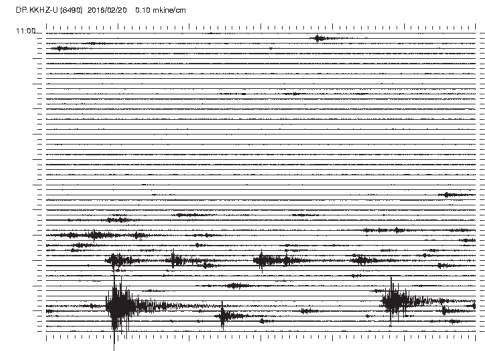


Fig.2 (cont.): (b) Example of seismic waveform at station DP.KKHZ in the same time range shown in Fig.2 (a). Seismic records with low noise are obtained in the dry season.

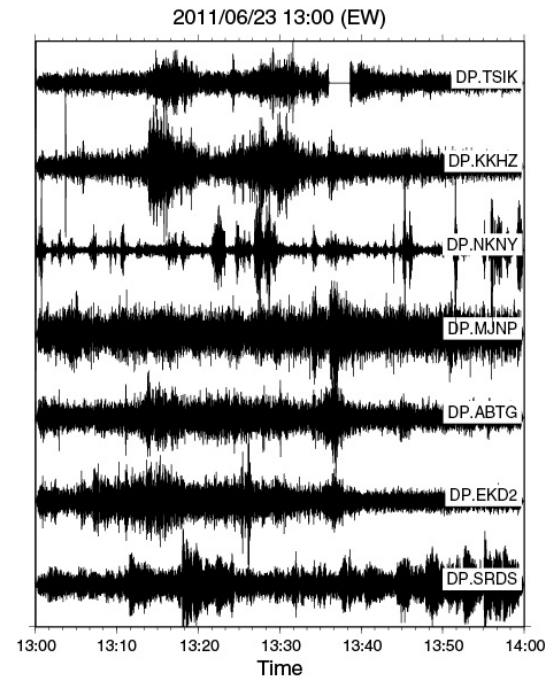


Fig.3 : Seismic waveform data observed in Kamikochi when a debris flow took place in the Ubuya-sawa valley on June 23, 2011. EW components waveforms from 14:00 to 15:00 (JST) are shown.

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。

4.3 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

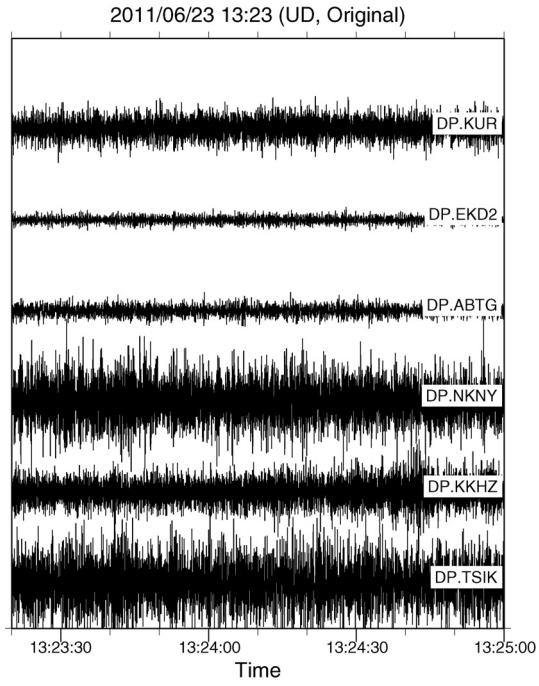


Fig.4 : (a) Example of the waveforms used for the analysis. For the location of seismic stations, see Fig.1. Original waveform of the UD components with 50Hz sampling rate are shown.

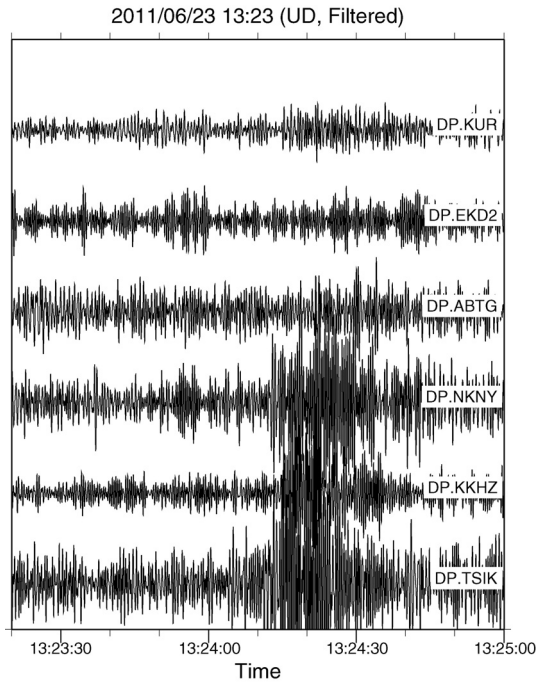


Fig.4 (cont.) : (b) Example of preprocessed waveforms (1). Bandpass filter (1Hz – 3Hz) is applied to the original waveforms shown in Fig.4 (a).

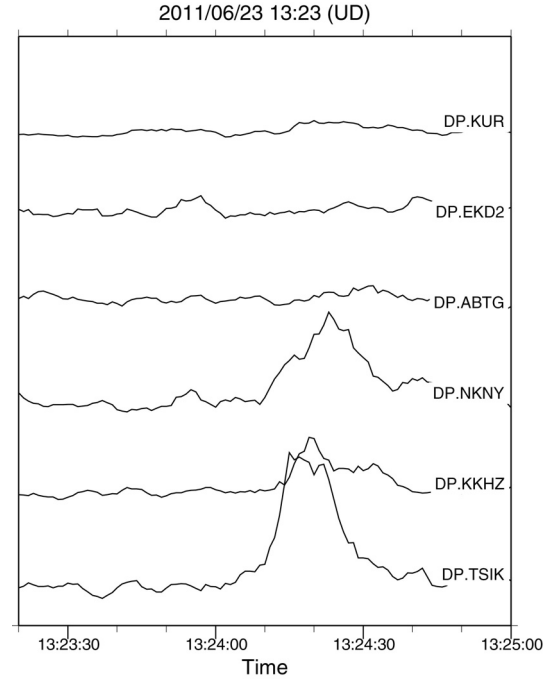


Fig.4 (cont.) : (c) Example of preprocessed waveforms (2). First, envelope waveforms of the band pass filtered waveforms shown in Fig.4(b) are calculated. Then, five (5) seconds moving average processing is applied. Finally, down sampling to 1Hz are performed and used for the analysis.

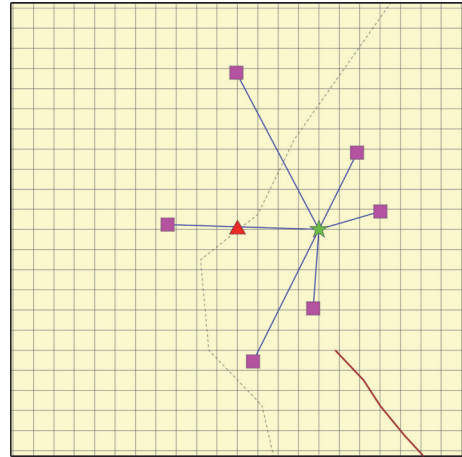


Fig.5 : Configuration of the grid points in the target area together with the schematic of the analysis. Grids of 40m spacing are configured in the 10km x 10km area. Red triangle shows the Yake-dake volcano while magenta squares show the seismic stations. Seismic source is assumed at each grid point (green star) and theoretical and observed waveform amplitude are compared at each seismic station to determine the best location of the seismic source in the grid search scheme.

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いる．

4.4 サイト増幅特性の推定

同じく3章で示したように，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．

4.5 振動源位置の推定

Fig.4(c)に示した波形データを用いて，3章で示した，(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．

Table 1 : Site amplification factor at each seismic station used in this study. Vertical (UD) component waveform of an M2.5 earthquake on June 30, 2011 located in mid Nagano prefecture was analyzed. They are normalized by the value at station DP.KKHZ.

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

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 $f=2\text{Hz}$ ．

4.6 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)やFig.7(a)の振動波形は，立ち上がり時間

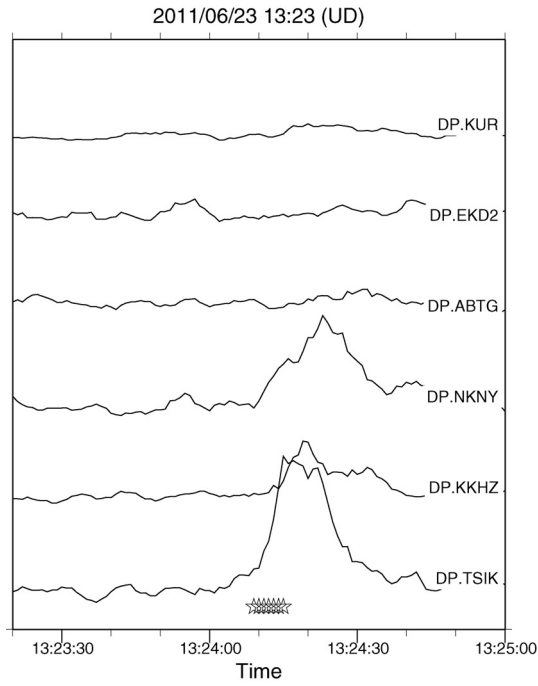


Fig.6 : (a) Preprocessed waveform from 13:23:20 to 13:25:00 (JST) in June 23, 2011. They exhibit clear peaks at stations DP.TSIK, DP.KKHZ, and DP.NKNY. Open stars denotes the estimated origin times of the seismic signal.

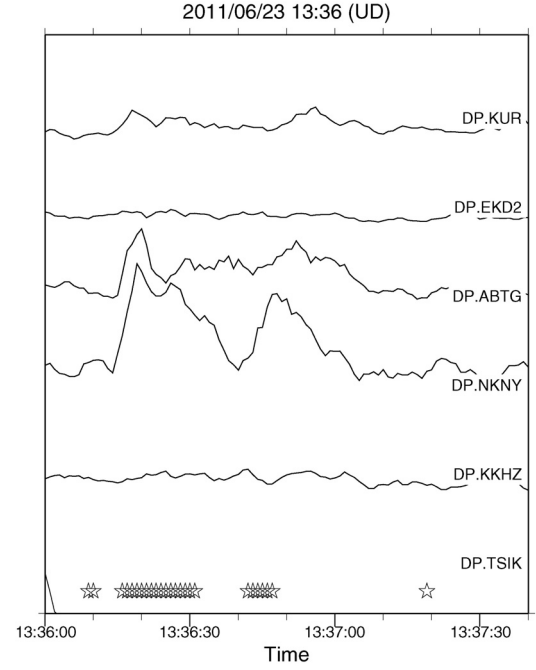


Fig.7 : (a) Preprocessed waveform from 13:36:00 to 13:37:40 (JST) in June 23, 2011. They exhibit clear peaks at stations DP.ABTG and DP.NKNY. Because of the power failure due to the debris flow, DP.TSIK has no data in this time range.

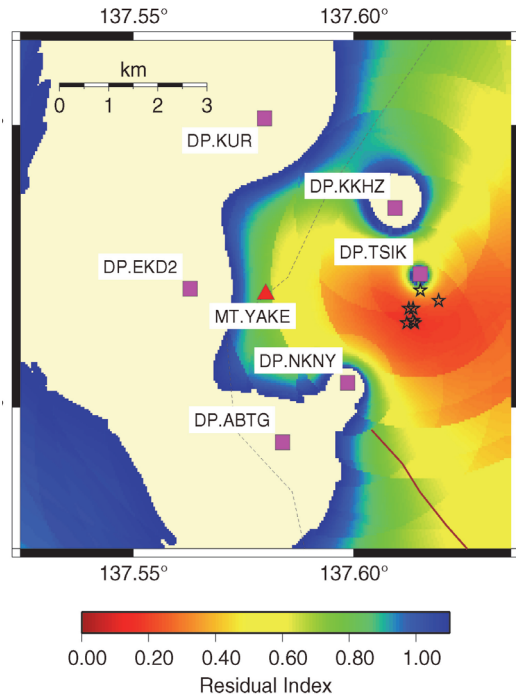


Fig.6 : (b) Estimated location of the seismic source in the time range shown by open stars in Fig.6(a). Open stars in the figure show the seismic sources, which are located near Ubuyasawa valley at the south of DP.TSIK, where the debris flow is reported.

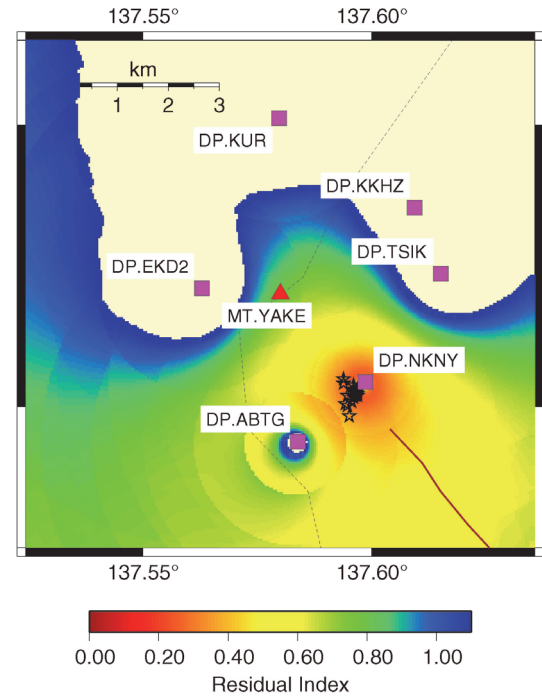


Fig.7 : (b) Estimated location of the seismic source in the time range shown by open stars in Fig.7(a). Open stars in the figure show the seismic sources, which are near station DP.NKNY. Data absence of the station DP.TSIK might have affected the error in the relocation of the seismic source.

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(2012)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かとと思われる。

5. まとめと今後の課題

地震計が捉えた地動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ものと考えられ、今後の課題である。試験解析を行った2011年6月の土石流以降、2016年5月末まで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が、今後もそのような機会を利用して引き続き、本システムの検証と改良を行っていききたい。

謝 辞

本研究は、平成25年度国土交通省河川砂防技術研究開発制度・河川砂防技術研究開発公募・地域課題分野（砂防）採択課題「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」の成果の一部である。本研究の遂行にあたり、共同研究者の西村太志博士、熊谷博之博士の多大なるご指導に感謝する。また、本研

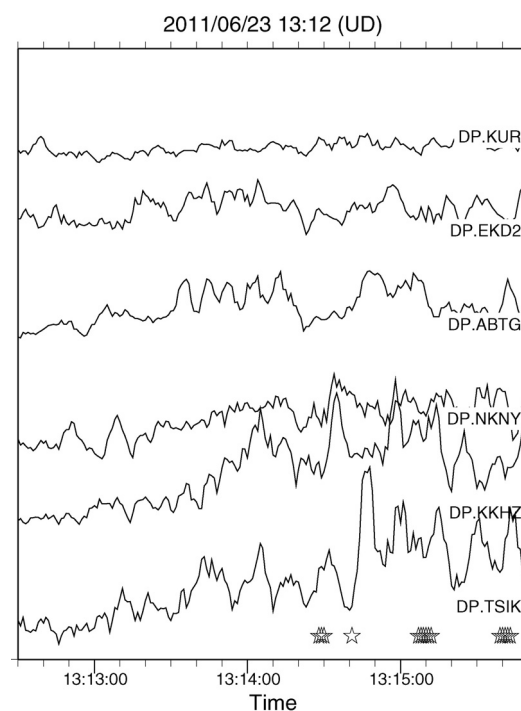


Fig.8 : (a) Preprocessed waveform from 13:12:30 to 13:15:50 (JST) in June 23, 2011. They exhibit no clear peaks but gradual increase of the amplitude. Open stars denotes the estimated origin times of the seismic signal.

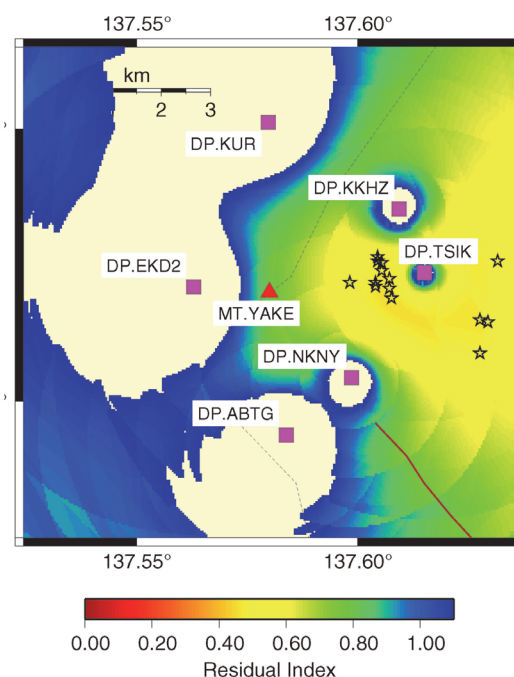


Fig.8 : (b) Estimated location of the seismic source in the time range shown by open stars in Fig.8(a). Open stars in the figure show the seismic sources, however, the estimation error is larger than those in Fig.6(b) and Fig.7(b)

究の実施にあたって、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、ご協力をいただいた。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いた。ここにあつくお礼を申し上げる。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地震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いた。併せてお礼を申し上げる。

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.

（論文受理日：2016年6月13日）