

# 地盤振動を活用した土石流の移動速度推定手法の提案

武澤永純\* 神野忠広\*\* 柳町年輝\*\*\* 山越隆雄\*\*\*\* 田村圭司\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

火山や地震等による大規模土砂災害から人命を守るため、砂防施設の整備に加え、危機管理体制の確立が重要である。そのために、土石流検知センサーを活用して土石流の発生を把握することは有効な手法と考えられる。

土石流検知センサーは土石流の発生情報を正確に把握することが要求されるが、さらに、発生した土石流の規模を同時に推定することが出来れば、危機管理体制の充実化が図れると考えられる。近年、振動検知式土石流センサー（以下、振動センサー）の利用が進み<sup>例えぼ1)</sup>、同センサーによる土石流の発生情報の把握については、様々な手法が提案されている<sup>例えぼ2)</sup>。しかし、規模の推定については、土石流の振動とピーク流量に正の相関関係があることが示されているものの<sup>例えぼ3)</sup>、その関係が得られた溪流にある礫の大きさや、振動が伝達する地盤特性等の影響が含まれているため、これらの結果を他の溪流に直接適用することは難しいと考えられる。

ところで、焼岳で発生した土石流の観測事例によると、土石流の振動波形は先頭部が測定点に到達する20秒ないし30秒前から徐々に増大することが確認されている<sup>3)</sup>。これは、土石流が接近するにしたがって、土石流と測定点の距離が短くなり振動強度の距離減衰が少なくなること等が考えられるが、その傾向は土石流の移動速度が大きければ、増幅が急激になり、移動速度が小さければ増幅が緩やかになると推察される。

つまり、振動波形の増幅傾向から土石流の移動速度が推定可能と考えられる。移動速度は土石流の規模を示す指標と成り得るため、これが明らかになれば、観測事例がない溪流においても、振動波形から土石流の規模が推定できると考えられる。本研究では、長野県焼岳の上々堀沢で観測された土石流の振動データを基に、振動波形の増幅傾

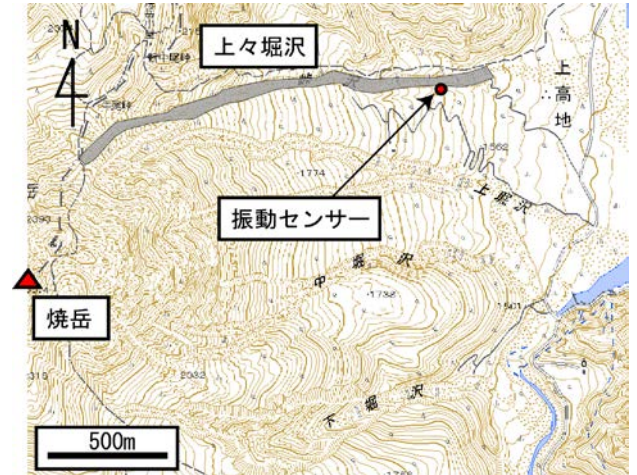


図-1 焼岳上々堀沢の平面図  
(国土地理院発行1/2.5万地形図参照)



写真-1 焼岳上々堀沢で発生した土石流<sup>10)</sup>

向と土石流の移動速度を評価する手法を提案し、その適用可能性を検証したので、ここに報告する。

## 2. 解析データ

検討に用いたデータは焼岳（長野県松本市安曇上高地、図-1）で1988年から2005年の間に発生した土石流35事例である<sup>4)~9)</sup>。このデータについては土石流の振動波形およびピーク流量、水位、最大表面流速等が観測されている。表-1に本研究で活用する土石流のデータを示す。上々堀沢は流域面積1.37km<sup>2</sup>（谷の出口では0.8km<sup>2</sup>）振動センサー付近の河道勾配は約8度、河道の中心から振動センサーまでの距離は12mである。

表-1 本研究で検討する土石流の諸元

土石流 No.	日付	先端部通過時刻	流量 (m <sup>3</sup> /s)	最大表面流速 (m/s)	水位 (m)
1	1988.09.12	3:12:50	15.8	2.8	1.9
2		3:16:38	10.2	4.8	1.2
3		3:19:30	5.8	3	0.9
4		3:35:21	67.5	5.7	3.2
5		3:39:04	48.3	5.5	2.8
6		3:40:56	22.6	4.7	2.2
7		3:42:20	17.4	4.2	1.8
8	1993.7.14	16:21:20	22	3.6	2.7
9		16:23:38	18.2	4	2.1
10		16:29:04	15.8	3	2.3
11	1997.7.17	13:25:59	127	6.4	4.3
12		13:27:31	46	5.6	2
13		13:28:30	67	6.6	2.3
14		13:30:51	33	5.2	1.6
15		13:31:51	36	5.1	1.7
16		13:32:55	28	5.2	1.4
17		13:33:54	22	5.1	1.2
18		13:34:57	38	5.3	1.9
19		13:39:01	30	4.7	1.6
20	1997.8.5	9:56:55	9.6	2.6	1.4
21		10:00:23	5.5	2.8	1.1
22		10:05:01	1.4	2	0.45
23	1997.9.8	3:29:29	8.1	1.8	1.4
24		3:30:56	5	3.6	0.6
25		3:32:47	1.6	2.7	0.3
26		3:34:03	7.9	4	0.8
27		3:35:52	6.3	3.5	0.7
28		3:39:23	22.5	4.8	1.7
29		3:40:02	3.8	3.4	0.4
30		3:41:46	6.7	3.5	0.7
31		3:43:55	1.3	2.5	0.2
32		3:48:45	5.7	2.4	0.9
33	2002.7.13	20:41:57	7.8	2.4	0.76
34	2004.7.18	4:20:00	117	6.9	2.9
35	2005.7.12	8:33:00	105	5.94	2.6

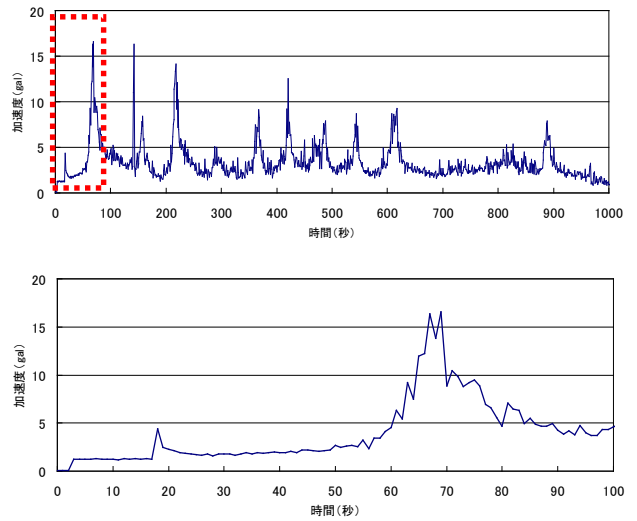


図-2 土石流の振動波形 (1997.7.17の事例 上：土石流全体の波形、下：上図の0~100秒(破線部))

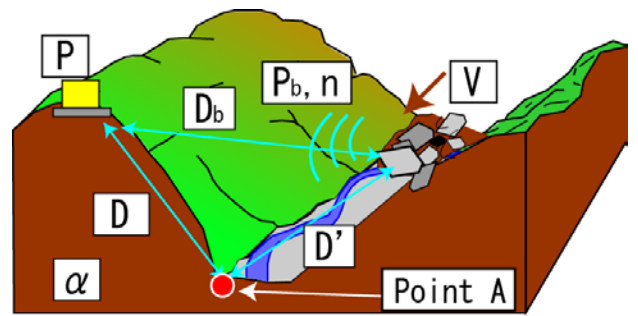


図-3 モデルの概念図

図-2に1997年7月17日に観測された土石流の振動波形(鉛直成分)を示す。これをみると、土石流の振動は突然ピークに達するわけではなく、50秒あたりから徐々に振動が大きくなり始め、68秒あたりでピークに達していることが分かる。本研究ではこのような振動の増幅傾向に着目するものである。

### 3. 土石流の移動速度に基づいた振動波形の増幅傾向の評価手法について

写真-1に焼岳で発生した土石流の写真を示す。焼岳で発生する土石流の形態は主として石礫型である。石礫型土石流の特徴として、先端部は段波状を呈し盛り上がっていること、巨大な石が多く、質量が集中しているのは先端部の通過するほんの数十秒程度で後続の流れは泥流状を呈し、漸次減衰する等が示されている<sup>11)</sup>。ここで、振動セン

サーに到達するまでの土石流の振動は巨礫が河床に衝突した際の振動であると考えられるため、巨礫が集中する先端部が主な振動源と考えられる。よって、土石流の先端部を点震源と仮定し、既往の振動の距離減衰式を活用して、流下する土石流がセンサーに接近していく過程を、距離減衰式における振動源までの距離が時間的に短縮していく過程に置き換えることで、振動の増加傾向の評価を試みるものである。その評価手法<sup>12)</sup>を式(1)、(2)に示す。また、その概念図を図-3に示す。

$$P_b(t) = P \cdot \left( \frac{D_b}{D} \right)^{-n} \cdot \exp(-\alpha(D_b - D)) \quad (1)$$

$$D_b = \sqrt{D^2 + (Vt')^2} \quad (2)$$

Pb : 距離Db離れた位置での振動の大きさ(gal)、  
t' : 土石流が振動センサーに接近するまでに要した時間(土石流が振動センサーに最も接近した時

間を0とする)、P：距離D離れた位置での振動の大きさ(gal)、Db：土石流と振動センサーとの距離(m)、D：振動センサーとA点との距離(m)、t：時間(s)、V：土石流の移動速度(m/s)、 $\alpha$ ：地盤内部減衰定数、n：幾何減衰定数

式(1)は既往の振動の距離減衰式である。同式はある地点における振動(基準振動)を参考に任意の地点の振動を推定するものであるが、本手法は、前者を土石流が振動センサーに最も接近したときの振動、後者を任意の時間における土石流の振動に置き換えている。それを式(2)で表現している。

この式の着目すべき点は、 $t'$ が増加することにより、 $Pb$ が減少していくことである。つまり、土石流が最も接近したときの時間を0とし、その時点から過去にさかのぼって土石流の振動の減衰過程を追跡することが出来る。それを逆に見れば、土石流の振動の増幅傾向を再現することになり、増幅傾向をもっともよく再現できるVがその土石流の移動速度と考えられる。

そこで、式(1)、(2)を用いて土石流の振動波形の増幅傾向を再現し、土石流の移動速度の推定を行った。なお、土石流の移動速度Vについては、土石流のピーク流量が観測されたときの最大表面流速を0.6倍した値を移動速度とし<sup>13)</sup>、この速度で土石流が等速で流下していると仮定した。

#### 4. 物性値の設定について

式(1)、(2)から土石流の移動速度を推定するにはいくつかの物性値を設定する必要がある。また、振動の振幅値についても、振動波形の増幅傾向を良好に再現できる値を採用する必要がある。ここでは、土石流の移動速度を評価するための最適な物性値と振幅値の設定方法について検討した。

##### 4.1 地盤内部減衰定数と幾何減衰定数

式(1)の物性値において、地盤内部減衰定数 $\alpha$ と幾何減衰定数nを設定する必要がある。 $\alpha$ は以下の式で表される<sup>14)</sup>

$$\alpha = \frac{2\pi f}{V_s} \eta \quad (3)$$

$\alpha$ ：地盤内部減衰定数、f：周波数(Hz)、 $V_s$ ：伝播速度(m/s)、 $\eta$ ：損失係数

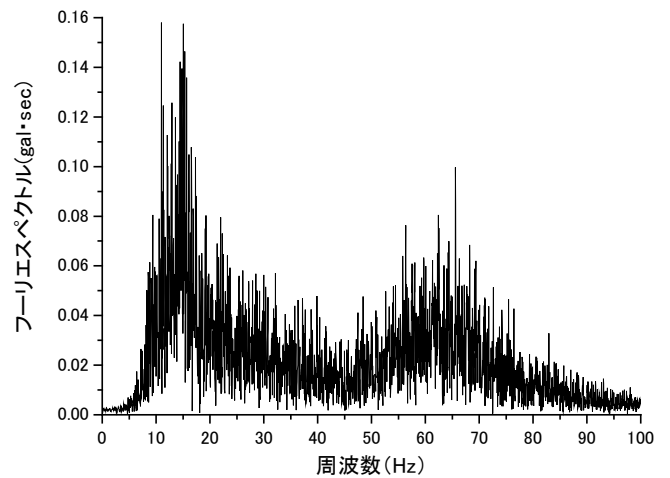
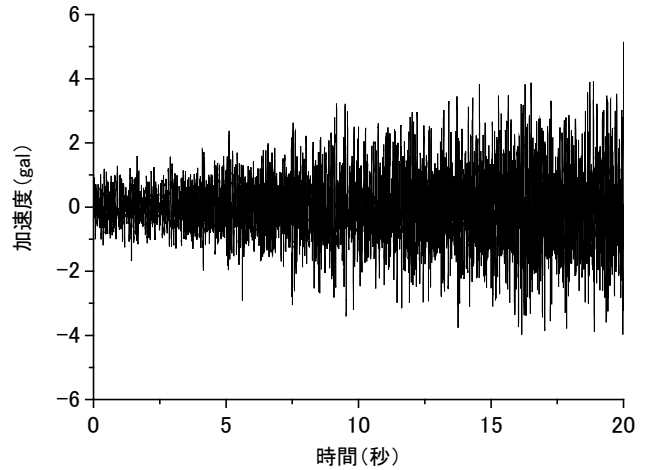


図-4 振動の立ち上がり部の時刻歴波形とフーリエスペクトル(表-1土石流No.8の例)

これらについて、各土石流の振動が増幅する箇所(振動加速度が最大値を示したところから前20秒間)についてスペクトル解析を行った。図-4に代表的な一例を示す。振動特性は概ね10~25Hzと50~75Hzにピークが見られるが、遠くから流下してくる土石流の振動を評価する場合には、減衰が著しい高い周波数帯域の振動よりも、減衰が相対的に小さい低い周波数帯域の振動によって評価することが有効であると考えられる。また、当該地点の地盤は砂礫を主体としており、これをもとに過去の研究成果<sup>14)</sup>から損失係数を推定すると0.01~0.03、0.05~0.06となる。上々堀沢のこの観測点近傍における弾性波の伝播速度は既往の研究成果から300m/sと推定されている<sup>15)</sup>。よって、周波数を20Hz、損失係数を0.02、0.055の2つの値を用いたところ、地盤内部減衰定数はそれぞれ0.008、0.023が算出された。

幾何減衰定数 $n$ について、土石流の振動の増幅が確認できる時間は20秒であり、本検討で対象とする土石流の移動速度は最大で4.14m/s（表-1 土石流No.34の流速6.9m/sを0.6倍）であるから、距離減衰の対象となる範囲は最大で83mとなる。この距離内の振動は、表面波（ $n=0.5$ ）と実体波（ $n=1.0$ ）を分離することは困難であることから、両者が混在した波と想定し、 $n=0.75$ とした。

4.2 振動の振幅値

振動波形は加速度であり、1秒間に1500データと非常に多いデータが記録されているため、1秒間を単位としてその間に計測されたデータの絶対値の代表値を整理した。

振動の大きさを評価するためには最大加速度を用いるのが一般的であるが、図-4の時刻歴波形を見ると、加速度はばらついており、中にはパルス的な箇所もみられる。本検討は振動の増幅傾向に焦点を当てているため、最大加速度よりも、任意の時間帯における加速度の大きさを代表している値を採用する方が増幅傾向をより精度よく推定できるとされる。よって、本検討では、1秒単位の加速度の最大値と、1秒単位の加速度の相対度数99%値を用いて、本手法における両者の有効性を検討した。

4.3 解析方法

解析条件および解析方法の流れは以下の通りである。

- 1) 本検討で用いる波形は表-1に示す35事例の土石流振動波形である。振動成分は鉛直方向とし、計測値を絶対値に変換する。
- 2) 振動波形は、1秒間を単位としてその間に計測されたデータのうち、最も大きな加速度値および相対度数99%値をその1秒間の代表値とする。
- 3) 既往資料<sup>4)~9)</sup>を元に土石流の段波のピーク流量観測時刻に合致する振動波形の箇所を決める。振動加速度と流量のデータは時間の同期ができないため、報告書に記載されている時間帯で最大加速度を示した箇所をピーク流量が観測された時刻とした。
- 4) 振動が増幅している時間は、振動のピークの時間から前20秒間とする。
- 5) 振動の観測波形について、式(1)、(2)から得られた解析値と比較する。比較に当たって

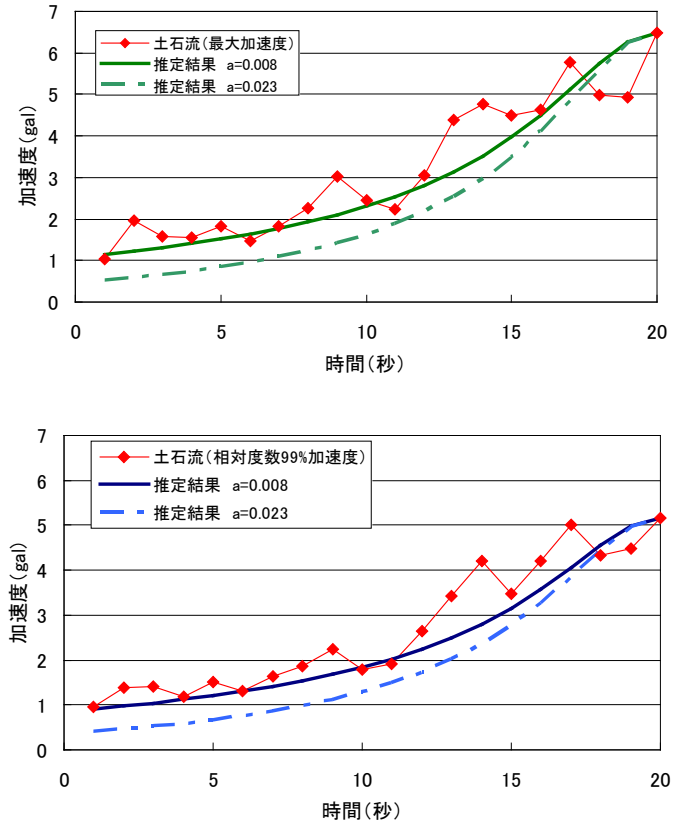


図-5 解析結果の一例（表-1土石流No.4）

表-2 各ケースの残差平方和

土石流 No.	土石流発生年月日	最大加速度の残差平方和		相対度数99%加速度の残差平方和	
		$\alpha=0.008$	$\alpha=0.023$	$\alpha=0.008$	$\alpha=0.023$
1	1988.09.12	7.7	8.8	4.0	7.5
2		2.2	6.9	1.4	4.5
3		4.7	10.5	2.3	5.6
4		8.1	21.7	5.6	15.7
5		12.0	27.1	14.1	26.7
6		2.5	6.6	0.9	4.0
7		4.7	5.4	2.8	6.7
8	1993.7.14	9.4	5.0	1.8	2.1
9		11.9	25.6	13.0	24.3
10		19.8	20.9	7.5	11.5
11		35.8	66.9	70.5	113.3
12		324.7	397.5	9.9	27.6
13		10.9	26.6	10.7	12.8
14		16.2	35.4	8.3	23.5
15	1997.7.17	103.4	99.3	13.1	23.2
16		90.1	146.6	42.2	73.5
17		28.7	48.8	11.0	25.9
18		84.6	162.9	116.5	167.5
19		6.7	9.9	2.6	5.0
20		18.9	14.3	3.7	3.8
21		1997.8.5	4.2	7.1	3.3
22	2.5		3.8	0.9	1.7
23	1997.9.8	77.1	53.4	12.2	6.6
24		67.7	63.5	8.1	17.1
25		41.2	35.0	32.9	27.5
26		128.1	99.0	52.9	42.0
27		26.7	34.3	10.6	16.3
28		193.0	140.6	120.7	87.5
29		13.9	11.1	4.6	10.2
30		33.1	24.0	10.5	8.0
31		9.8	12.3	2.7	6.9
32		70.1	46.2	24.8	16.0
33	2002.7.13	8.2	12.2	3.3	5.9
34	2004.7.18	4.5	16.0	8.1	22.7
35	2005.7.12	170.1	72.5	88.6	47.6

は加速度の代表値を2パターン、内部減衰の $\alpha$ を2パターン変えた計4パターンについて計算し、得られたデータと実測データとの残差の平方和を計算した。その結果から最も値が小さいものを振動の増幅傾向を再現しているパラメータとする。

#### 4.4 地盤内部減衰定数と振動の振幅値の設定について

前章で示した方法を元に検討した結果の一例を図-5に示す。図-5より、解析値は観測結果の振動の増幅傾向を概ね表現していることがわかり、本手法で土石流の振動の増幅傾向を再現できる可能性が示唆される。

各土石流について、振動の振幅値、地盤内部減衰定数を変えた4パターンの計算結果とそれぞれの土石流の振動波形のデータにおける残差の平方和を算出した。その結果を表-2に示す。表の色塗りされたケースは、各ケースの中で残差平方和を最小とするパラメータであることを示しているが、これより、相対度数99%加速度で評価した結果は35事例中31事例（全体の約89%）であったことが判る。相対度数99%加速度、地盤内部減衰定数0.008の場合35事例中23事例（全体の66%）であることが判る。よって、相対度数99%加速度、地盤内部減衰定数0.008の組み合わせが、振動の増幅傾向を最もよく再現できる条件であることがわかった。

#### 5. 評価手法の適用可能性の検証

前章より、振動の増幅傾向を最もよく再現できる物性値を設定することができた。そこで、本手法を用いることで、土石流の移動速度をどの程度推定できるのか確認を行った。

表-1に示す35事例の土石流について、振動の増幅傾向を本手法（加速度は相対度数99%加速度、地盤内部減衰定数は0.008）で再現し、そのときの移動速度を算出した。その値を縦軸に、観測値（土石流の最大表面流速を0.6倍したもの）を横軸に示したものを図-6に示す。グラフの実線は解析値と観測値が等しい、すなわち1:1である場合を示しており、破線は解析値と観測値の関係が2:1、もしくは1:2であることを示している。

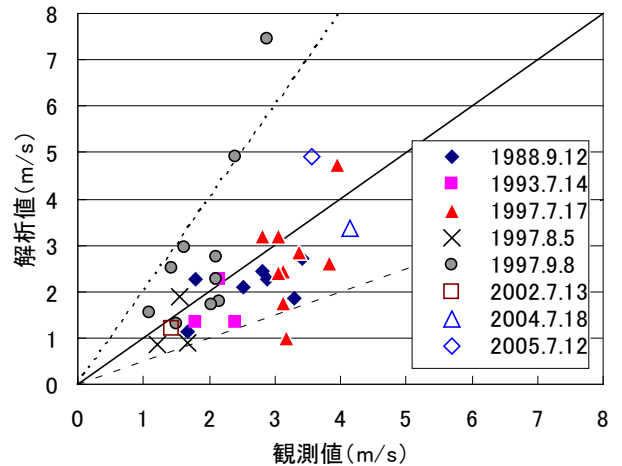


図-6 解析値と観測値との比較

図-6より、本手法で求めた移動速度について、観測値の50~200%以内のデータは35事例中32事例（91%）であった。これより、本手法は土石流の移動速度を概ね50~200%の範囲で推定できることがわかった。

#### 6. まとめ

本手法を用いることで、振動の増幅傾向から土石流の移動速度が概ね推定できることがわかった。これまでは、土石流の流量と振動の関係が不明な場合、振動の振幅値の大小で土石流の規模を評価していたが、本手法により、土石流の規模をより定量的に推定することが出来ると考えられる。

例えば、地震による天然ダムの発生、火山噴火による降灰等によって土石流の危険性が高まった溪流においては、既往の観測実績がない溪流に振動センサーが設置されることが考えられる。ここで、仮にその溪流で土石流が発生した場合、本手法で移動速度を推定することが出来れば、地形条件（河床勾配、河道幅）から土石流のピーク流量が概ね推定でき、その後の応急対策の規模等が判断できるようになると考えられる。

#### 謝 辞

振動データの整理、解析にあたっては京都大学防災研究所諏訪浩准教授にご指導いただいた。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 皆川淳、澤田悦史、松井宗廣、渡部文人、高場悦郎：振動センサーを用いた土石流発生回数 の推定、平成21年度砂防学会研究発表会、pp.150-151、2009.
- 2) 大角恒雄・長山孝彦・榎納智裕：振動センサーによる土石流・地震・ノイズ識別検知に関する一考察、砂防学会誌、Vol.59、No.3、pp.38-43、2006.
- 3) 諏訪浩・山越隆雄・佐藤一幸：地盤振動計測による土石流の規模推定、砂防学会誌、Vol.52、No.2、pp.5-13、1999.
- 4) 建設省北陸地方建設局松本砂防事務所（1989）：焼岳・浦川における土石流調査関係資料集XIV、技術資料No.22、1989.
- 5) 京都大学防災研究所・建設省北陸地方建設局松本砂防事務所（1999）：平成3～6年焼岳土石流観測および解析、技術資料、1999.
- 6) 京都大学防災研究所・建設省北陸地方建設局松本砂防事務所：平成7～9年焼岳土石流観測および解析、技術資料、1999.
- 7) 京都大学防災研究所：平成14年度焼岳土石流観測および解析受託業務報告書、2003.
- 8) 京都大学防災研究所：平成16年度焼岳土石流観測および解析受託業務報告書、2005.
- 9) 京都大学防災研究所：平成17年度焼岳土石流観測および解析受託業務報告書、2006.
- 10) 国土交通省砂防部ホームページ：<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link03021.htm>
- 11) 奥田節夫・諏訪浩・奥西一夫・仲野公章・横山康二：土石流の総合的観測その3 1976年焼岳上々堀沢、京都大学防災研究所年報 20B-1、237-263、1977.
- 12) 小林芳正：建設における地盤振動の影響と防止、鹿島出版会、p.69-70、1977.
- 13) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究、京都大学防災研究所年報 20B-2、405-435、1977.
- 14) 子安勝：騒音・振動（上）、コロナ社、p.204、1978.
- 15) Suwa, H., Akamatsu, J. and Nagai, Y.:Energy radiation by elastic waves from debris flows, Proc. 3rd Inter. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment ed. by D. Rikkenmann & G.Wieczorek, Balkema, 895-904, 2003.

武澤永純\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 研究員  
Nagazumi TAKEZAWA

神野忠広\*\*



国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所 所長  
Tadahiro KANNO

柳町年輝\*\*\*



株式会社拓和（前独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 交流研究員  
Toshiki YANAGIMACHI

山越隆雄\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 主任研究員  
Takao YAMAKOSHI

田村圭司\*\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 上席研究員  
Keiji TAMURA