

# 振動センサーによる土石流検知データの 周波数分析およびエンベロープ解析への適用

## STUDY ON DEBRIS FLOW DETECTION VIBRATION SENSOR SYSTEM USING FOURIER SPECTRUM AND ENVELOPE-ANALYSIS

大角 恒雄<sup>1</sup>・長山 孝彦<sup>2</sup>・楨納 智裕<sup>3</sup>

Tsuneo OHSUMI, Takahiko NAGAYAMA and Tomohiro MAKINO

<sup>1</sup> 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 つくば市稲荷原 2304)

<sup>2</sup> 日本工営株式会社 札幌支店 (〒060-0005 札幌市中央区北 5 条西 6-2)

<sup>3</sup> 北海道函館土木現業所(〒041-0806 函館市美原1丁目 47-8)

### 1. はじめに

日本の地形特性から、土石流災害は近年も数多く発生している。土石流災害は秋田県鹿角市八幡平(平成9年5月, 温泉宿全壊), 鹿児島県出水市針原川(平成9年7月, 死者21名), 福島県西白川郡西郷村(平成10年8月, 死者5名)と後を絶たない。平成15年も熊本県水俣地方で死者15名を出す土石流が発生した。土石流災害が懸念される地域で被害を軽減するためにはハード的対策である砂防設備に加え, ソフト的対策として警戒避難システムの確立, 災害直後に行方不明者の救出作業に伴う際の二次災害防止が重要な課題となっている。その手段の一つとして, 本検討では各種センサーの中で振動センサーを北海道の南東端(函館より30km 東方)に位置する恵山火山を源とし, 南西側に流下する白浜川と東側へ流下する水無沢川にそれぞれ機器を設置した(図-1)。

当該における土石流検知システムにおいて振動センサーを用い適用性を検討した事例をここに報告する。報告の対象とする事象は, 平成15年8月28日18時37分に発生した水無沢土砂流事例と同地点での地震他の雑振動との比較および振動センサーによる土石流検知の有効性について以下に紹介する。

### 2. 振動センサー計測経緯

鹿児島県桜島町野尻川において, 土石流の検知を目的としたセンサーが数多く設置され, 観測がなされている。山田ら<sup>1)</sup>は, 土石流検知システムの現状について幾つか整理している。

- ① ワイヤセンサーは一度切断されてしまうと新たに張り替えできない限り, 引き続いて流下する土石流を検知できない
- ② 張り替えるには作業員の二次災害による危険性が伴う

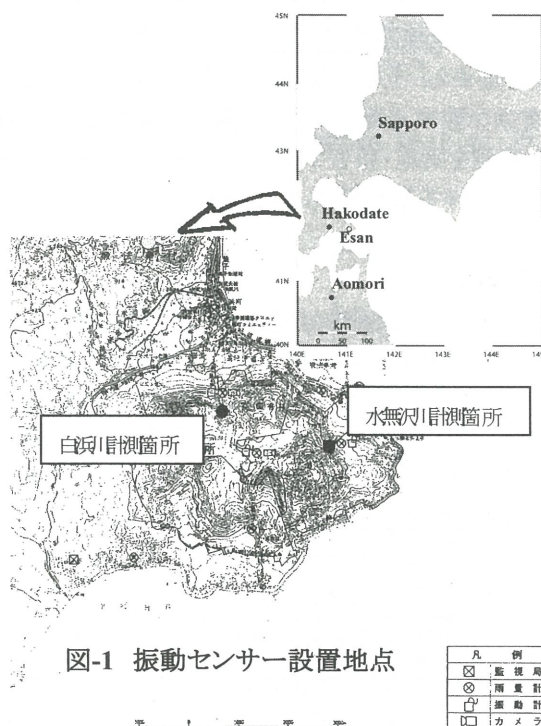


図-1 振動センサー設置地点

凡	例
⊗	観測点
⊙	測量点
□	振動計
□	カメラ

- ③ 落石や動物による切断も誤動作として挙げられる
- ④ 光センサーの場合は, 濃霧時の計測不能や昆虫等の付着による誤動作が考えられる

一方, 振動センサーは土石流の発生状況(土石流タイプや自然河道か三面張り等の河床状態による違い)によって振動の卓越振動数や伝播性, 減衰性が異なるため, 土石流検知警報レベル(しきい値)の設定が障害となっている。この問題を解決する試みとして, 山越・武澤ら<sup>2), 3)</sup>は振動センサーの適切な設置手法を検討し, 桜島野尻川, 黒神川および長野県小谷村浦川の現場状況に適応した設置方法を提案するための現地実験等を行い, 基礎データを収集している。石田ら<sup>4)</sup>は, 2000年11月21日に発生した富士山大沢川崩れの事例を用いて, ハイドログラフと地盤振動記録の発生時刻の対応を示している。これらの原著論文の根幹となる振

動センサーの観測波形の解析を述べた論文が幾つか報告されている。諏訪・清水<sup>5)</sup>は、計測強度は電気量で示され、振動の絶対値が示されていないが、雲仙で観測された土石流振動波形をパワー・スペクトルを用いて特性把握している。さらに、諏訪・山越ら<sup>6)~10)</sup>は、焼岳東斜面の上堀々沢において、1970年から土石流流動特性を調べる為の観測研究を行っている。焼岳では、ピーク流量が100m<sup>3</sup>/sec程度の土石流が通過するときに、100galに達すること、また、土石流先頭部の接近時には、振動の卓越周波数が10~30Hzの帯域に、先頭部が観測点を通過して遠ざかるときには、卓越周波数が60~80Hzの帯域に移行することが明らかになっている。

本検討は恵山火山を対象とした一考察<sup>11)</sup>で、上記研究の残された課題を解決するものではないが、上記問題点を踏まえ、土石流観測データを蓄積解析することで、有効な警戒避難システムの策定に資することを目的とし、計測を実施・報告することで、多くの研究者の資料として活用する事を願うものである。

### 3. 計測概要

振動センサーは地震および土石流振動を観測可能である。通常地震観測における時間刻みは、地震が1/100秒程度に対し、土石流振動観測は1/1000秒程度の記録に追従できる装置が必要となる。継続時間も兵庫県南部地震では十秒程度であるのに対し、1時間を超える継続時間が必要となる。1時間の土石流発生で36万個のデジタルデータが発生し、さらに同じ日に何回かの小規模土石流が前後に発生することとなる。よって、上記条件を満足する収録装置の仕様を検討し、十分な記憶容量を有する機器の選定を行うことが重要となる。本検討では、通常地震計よりも高い振動数(100Hz前後まで)を検知できる広帯域の感知精度(0.1~100Hz程度)を満足するボアホールタイプサーボ型振動計(東京測振:SV355)とした。収録装置は、上記継続時間に対応できるWindows 2000の環境で作動できる装置を開発した。また、商用電源の使用は現時点では困難なため、太陽電池とバッテリーによる電源供給とした。当該地点では携帯電話の受信が可能であり、携帯電話による観測状態供給をした。

### 4. 振動データと流量等との関係

上記水無沢川では、平成15年8月28日に小規模な土石流移動が観測された。この土石流移動の前後で河道測量および現地調査が行われている。その結果、最下流端(河口)までは土石流移動が達していないものの、区間延長100m当たり、数10~200m<sup>3</sup>程度の土石流が移動、

堆積したことが分かった。なお、水無川全体では約560m<sup>3</sup>の土砂生産(主として河岸侵食)があり、崖上部からの流出土砂60m<sup>3</sup>程度と合わせて、620m<sup>3</sup>の土砂が堆積したと考えられる。このうち、振動センサーを設置しているSP1200~SP1300間では合計200m<sup>3</sup>程度の土砂が移動していたことが分かった。一方でこの土石流移動発生直後に、その痕跡を記録するために土砂の流下確認調査を実施している。構造物や河床の大礫には流水痕跡が残っており、その高さを計測し前述の測量結果に合わせた。その結果、痕跡(図-2)からは、1~2m<sup>3</sup>/secのピーク流量であったことが想定された。振動波形観測によると、平成15年8月28日に観測された小規模な土石流移動は、数分間の無信号期間を1回挟み、合計14分以上の振動が継続した事が観測されている。このことから、2山のピークをもつ14分間に及ぶ土砂移動があったと想定できる。

また観察結果から、それぞれ以下のように条件を設定し、流砂量を山地河川で適合性の良い林・尾崎式<sup>12)</sup>にて試算した。

①見かけの土石流流量として、ピーク流量を1~2m<sup>3</sup>/secと仮定

②振動波形観測では、14分以上の2山のピークを持つ土砂移動であったことが想定されたが、ここではハイドログラフと振動波形の関係が明確に出来ていないため、2m<sup>3</sup>/secピークとした15分の三角形ハイドロの土砂移動が流下したと仮定

③現地の河床材料粒径等を用いる

その結果、およそSP1200地点(上流域;振動計設置位置)で200m<sup>3</sup>程度となり、測量調査結果とも、調和的な土砂量が得られた。

以上、今回の観測において、この現地観測情報と振動継続時間情報を合わせることで、大凡の流量と流出土砂量を想定した。

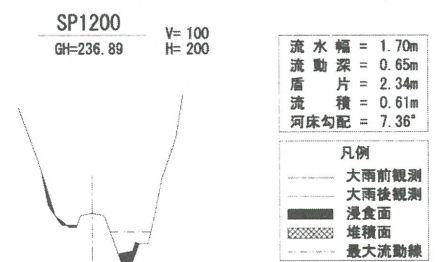


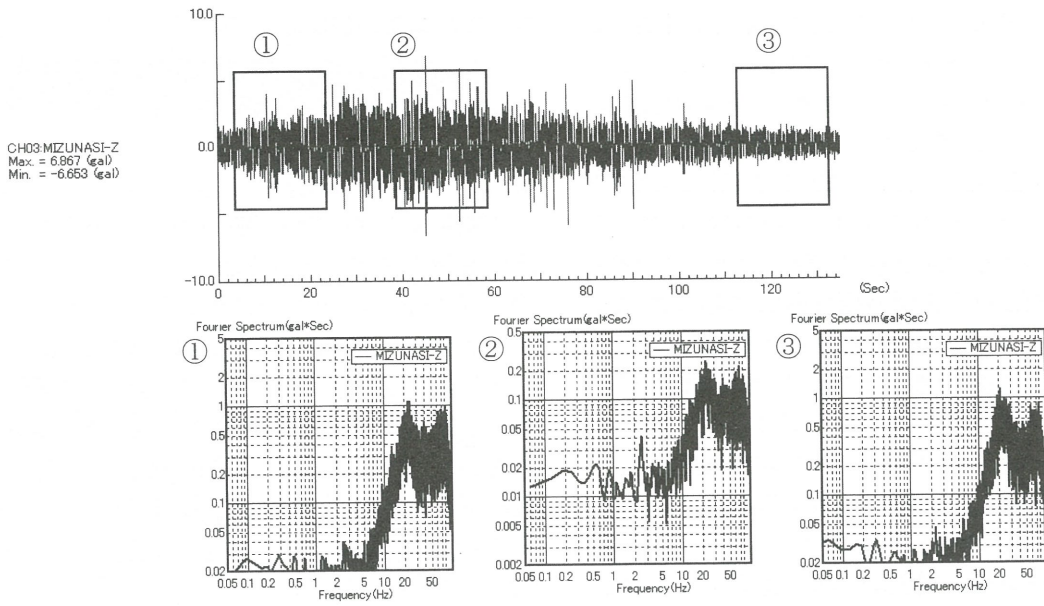
図2 河道断面観察状況

### 5. 振動波形の周波数特性

水無沢川地点の土石流(起動時刻:2003/08/28 18:37)と雑振動時の微動(起動時刻:2003/08/22 16:01)をフーリエ・スペクトルで比較した(図-3)。土石流は起動時刻:2003/08/28 18:30:23と起動時刻:2003/08/28 18:44:59, 起動時刻:2003/08/28 18:37:13の時刻歴波形を周波数分析し、時刻歴波形の下に示した。

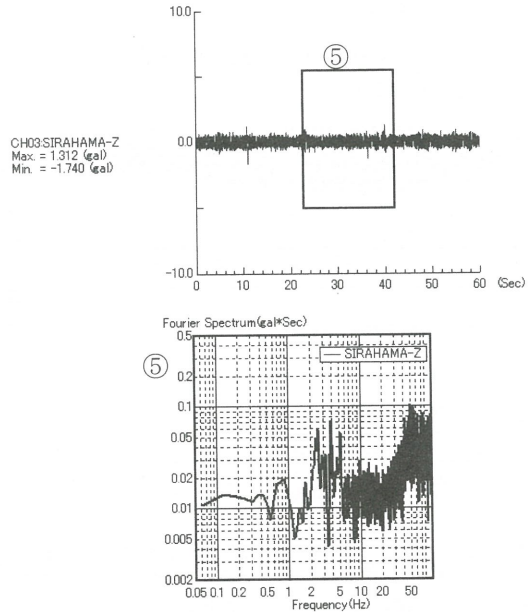
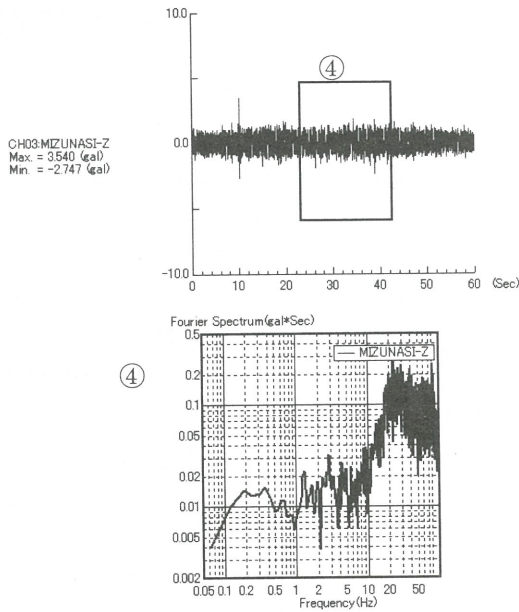


土砂流: 起動時刻: 2003/08/28 18:30:23



土砂流: 起動時刻: 2003/08/28 18:37:13

土砂流: 起動時刻: 2003/08/28 18:44:59



(参考)

雑振動時の微動記録(2003/08/22 16:01:17)

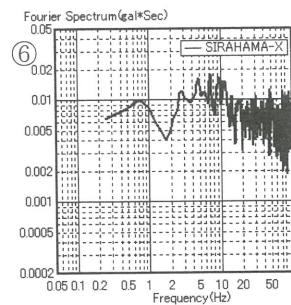
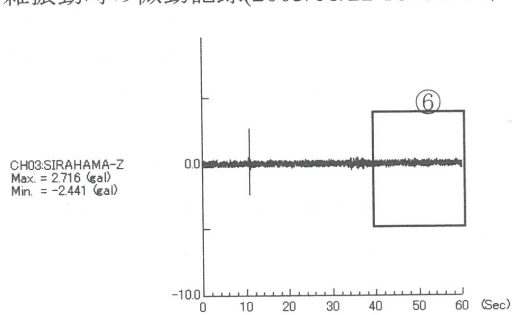


図-3 土砂流 8月28日と他のノイズとの周波数特性比較: 土砂流 18:30:23 では、①②③事象ともフーリエ・スペクトル形状は類似しており、20Hz、80Hz のピークを持つ。応答が小さくなり一見雑振動のようであるが、18:37:13 と 18:44:59 においてもスペクトル形状であり、同じ土砂流と判断した。比較として、天候の異なる雑振動時(2003/08/22 16:01:17)の微動記録(□内)のスペクトルは大きく異なることを示した。

18:30:23 では、①②③事象ともスペクトル形状は類似しており、20Hz, 80Hz のピークを持つ。応答が小さくなり一見雑振動のようであるが18:37:13と18:44:59においてもスペクトル形状であり、前節で述べた14分間に及ぶ土砂移動があったと想定される根拠となった。また、天候の異なる2003/08/22 16:01:17の雑振動時における微動記録(図-3 口内)のスペクトルとは大きく異なる。

非定常スペクトルを水無沢川地点の土砂流(起動時刻:2003/08/28 18:37)、地震は観測最大応答事象(起動時刻:2003/11/24 21:18)、雑振動は比較的連続的な事象(起動時刻:2004/01/08 11:26)を比較した(図-4)。土砂流は20Hz, 80Hz付近の成分が広範囲に分布している。20Hzの成分はほぼ全域にわたって分布し、80Hzの成分は最大値を挟んで前後に10秒程度ずつ分布している。地震波は全域にわたって10Hz以下の成分となる。雑振動は地震波よりも高い振動数を持つことがスパイク的なもので、継続時間は短い。

これらの特性は、感知した振動数のピークがどの帯域

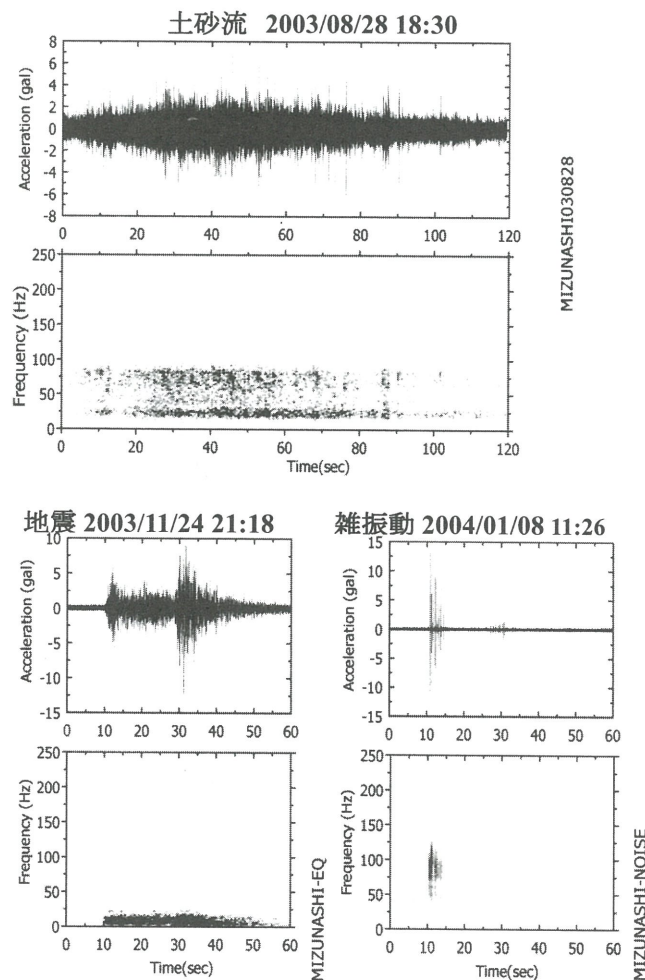


図-4 土砂流 8月28日(上図)と地震(下図左)と雑振動(下図右)との非定常スペクトルの比較

であるかの判断ができれば雑振動、土砂流の区別が可能となり、また、10Hz以上のハイパスフィルターをかけることで、土石流の検知にも有効であることが推測される。これは警戒装置の自動判断化へとつながるものである。

## 6. エンベロープ解析の応用

地震観測において、取得した振動の特徴把握や微動源の震源を決定する手法として、エンベロープ解析法<sup>13), 14)</sup>がある。エンベロープとは振動の包絡形状を表すものであり、その解析手法を上記3事象に適用した。

土砂流は全体的になだらかな連続的な振動の包絡形状となる。地震はP波とS波の到達時刻に大きな応答が生じる包絡形状となる。雑振動発生時はスパイク的な包絡形状となる。当該解析が土石流のような連続的な事象を判断する手法として有効であることがわかった。

### (1) エンベロープ解析法

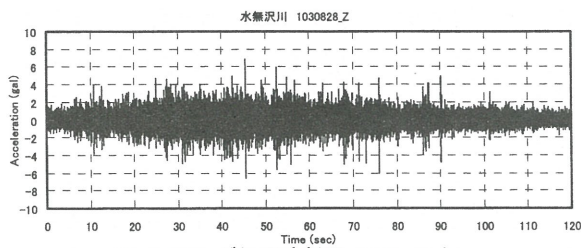
エンベロープとは振動の包絡形状を表すものである。実際の解析では、取得した振動記録をもとに、特定の周波数帯に着目するフィルタリング処理や平滑化等の数値計算を行い、エンベロープを求めた。エンベロープを求めるにあたり、振動記録の自乗平均振幅(Mean Square) やその平方根(Root Mean Square)からエンベロープを算出し、その形状の特徴を調べることが多い。両者はそれぞれMSエンベロープ、RMSエンベロープと称される。本検討では、P波とS波の検出に解析事例が多い、RMSエンベロープを採用した。算出法は、振動記録に対して、対象とする周波数帯のみを抽出するフィルタリング処理を施し、振幅の自乗の移動平均(平滑化を意味する)を取り、その平方根を求める。

本検討では、対象とする周波数帯の設定を下記の方針に基づくものとし、2種類のRMSエンベロープを求めたものとした。

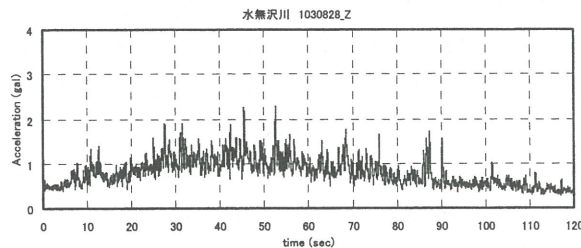
- ①地震時で数 Hz 程度の周波数が卓越することから、10Hz以下に着目する
  - ②土砂流時および雑振動で数十 Hz 以上の周波数が卓越することから、10Hz以上に着目する
- また、移動平均のデータ個数は100個(振動記録のサンプリング周波数500Hzであるので、0.2秒にあたる)とした。

図-5に土砂流観測記録を10Hz以上のフィルタリング処理を施した時刻歴波形(上図)とRMSエンベロープ解析結果(下図)を示す。フィルタリング波形が元波形(図-4)と差異がないことから観測波形の主成分が高全体的になだらかな連続的な振動の包絡形状となる。



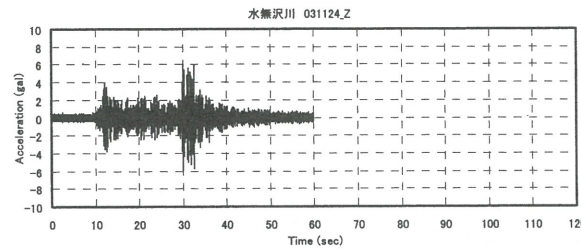


フィルタリング処理時刻歴 (10Hz 以上)

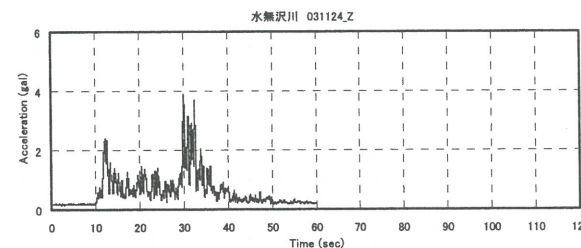


RMS エンベロープ解析結果 (10Hz 以上)

図-5 水無沢川 土砂流 2003/08/28 18:30

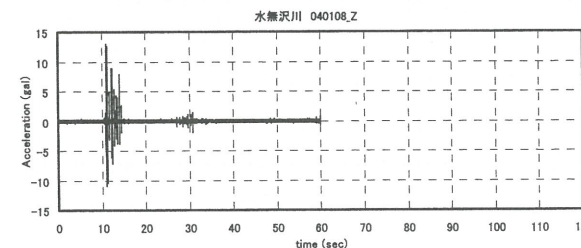


フィルタリング処理時刻歴 (10Hz 以下)

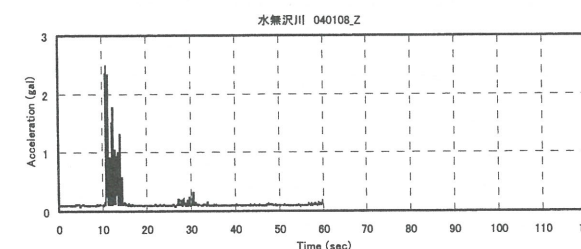


RMS エンベロープ解析結果 (10Hz 以下)

図-6 水無沢川 地震 2003/11/24 21:18



フィルタリング処理時刻歴 (10Hz 以上)



RMS エンベロープ解析結果 (10Hz 以上)

図-7 水無沢川 雑振動 2004/01/08 11:26

エンベロープ波形解析は図-6 に地震観測記録を 10Hz 以下のフィルタリング処理を施した時刻歴波形 (上図)とRMS エンベロープ解析結果(下図)を示す。上記同様、元波形と差異がないことから観測波形の主成分が 10Hz 以下であることがわかる。エンベロープ波形解析は、地震では P 波と S 波の到達時刻に大きな応答が生じる包絡形状となる。

図-7 に雑振動発生時観測記録を 10Hz 以上のフィルタリング処理を施した時刻歴波形(上図)と RMS エンベロープ解析結果(下図)を示す。上記同様、元波形と差異がないことから観測波形の主成分が高振動数側であることがわかる。エンベロープ波形解析は、雑振動が発生時はスパイク的な包絡形状となる。

上記特徴をリアルタイムに分析し、自動化することによって、土石流のような連続的な事象を判断する手法として有効であると思われる。

## 7. まとめ

水無沢川における振動センサーの観測データに関し、以下の一考察を得た。

(1) 土砂流、雑振動は 20Hz 以上、地震波は 10Hz 以下にピークを持つ。この特性は他の計測事例、たとえば富士大沢川で発生した土石流<sup>4)</sup>の傾向とも一致している。この傾向は感知した振動数のピークがどの帯域であるかの判断ができれば雑振動、地震と土砂流の区別が可能である。

(2) エンベロープ解析により、地震、雑振動はスパイク的な包絡形状となるのに対し、土砂流は全体的になだらかな連続的な振動の包絡形状となる。

土石流が頻発するような場所や噴火等で土砂移動が頻発し堆積土砂による河床変動の大きな所で維持管理が困難な場合は、ワイヤーセンサー等による感知は調整が必要であり、振動センサーの設置が適している。

今後の課題としては、流下方向に連続的に振動センサーを配置することも一つの手段である。感知が流速と距離に相当する遅れで、連続的に感知することで、土石流発生を確実に把握することがさらに感知精度を向上させることとなるであろう。具体的には、2 基以上の振動センサーを溪流の上下流方向に設置し、下流側の振動センサーが振動を検知した場合に土石流を検知するシステムとし、上流に設置した振動センサーは誤作動のチェックにも活用でき、土石流による地盤振動が上流側から下流側の順に距離と流下速度から推測される時間差で検知した場合に土石流を検知するシステムも構築可能である。

他の河川に振動センサーを設置する場合は、設置地点の地盤条件、土石流の型 (たとえば泥流型か石

礫型か), 埋設方法(地中埋設か地表設置か)で異なり, 計測結果よりトリガーレベルを設定する必要がある。また, 設置位置の計測値と河床での振動レベルの把握は, 本検討では設置時の常時微動計測による振動レベルの把握および伝達関数を算出したことは有効であった。

警戒システムの構築には, 直接アクセスできない危険区域内に設置することも課題である。これは, 下流の地域住民の避難警報発令するにあたり, より早い情報を伝達するには, 土石流発生起点の上流に近い地点での災害検知<sup>15),16)</sup>が必要であり, そのためには立入禁止区域内での検知が必要となる。さらに, 短期間で課題解決を実施しなければならず, 火山学, 振動工学, 機械工学, 電気工学の部門間のシンセシス(総合化)が不可欠となるであろう。

筆者らは, 本報告のように多くの地点の計測事例を報告することで, 新規性を競うのではなく, 多くの事例を紹介し合い, 研究者が様々な地点の見知を共有することで, 防災軽減に貢献できることを切望する。

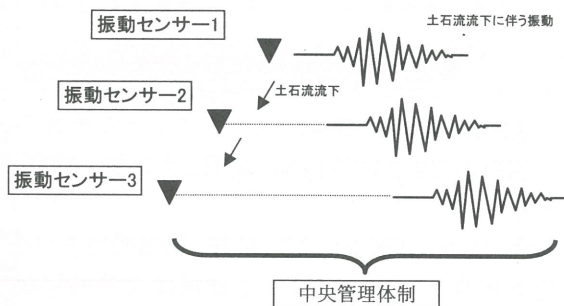


図-8 振動センサー土石流観測システム(案)の概念図

**謝辞:** 掲載認可していただいた匿名査読者の修正意見は, 非常に有意義なご指摘でありました。特に多くの参考文献の紹介を含む暖かいご支援, 貴重なご意見をご教示いただいた査読者に敬意を表します。今後の研究も参考にしてゆくとともに, 記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 山田孝, 南哲行, 水野秀明: 総合的な土石流検知手法の構築, 土木技術資料, 41-6, 1999, pp.20-23.
- 2) 武澤永純, 山越隆雄, 田中秀明, 小山内信智, 西本晴男, 大井孝輝, 鈴木啓介: 浦川における振動検知センサーのトリガーレベル設定方法の提案, 平成 16 砂防学会研究発表会概要集, JSECE, 2003, No.40, pp.154-155.
- 3) 笹原克夫, 田中秀明, 武澤永純: 振動式土石流検知センサーのトリガー設定手法に関する研究, 土木技術資料, Vol.46, No.6, 2004, pp.6-7.

- 4) 石田哲也, 浅井健一, 浅野広樹, 渡正昭, 小泉市朗, 井上公夫: 富士大沢川で発生した土石流の地盤振動特性, 砂防学会研究発表会概要集, 2003, pp.172-173.
- 5) 諏訪浩, 清水浩: 雲仙に発生した土石流と火砕流による地盤振動の特性: 文部省科研費(No.03306010) 報告書「1991 年雲仙における土石流の調査研究」(研究代表者: 平野宗夫, 111p), 1992, pp.40-51.
- 6) 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, 平成 11 年度砂防学研究発表会概要集, No.49, 1999, p.100-101
- 7) 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(新砂防), Vol.52, No.2, 1999, p.5-13
- 8) 諏訪浩, 山越隆雄, 奥西一夫: H7-H9 焼岳土石流観測および解析, 京都大学防災研究所技術資料, 1999, No.26 p.124-129
- 9) 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, 京都大学防災研究所年報, 第 20 号 B-1, 1977, pp.237-263
- 10) 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, 京都大学防災研究所年報, 第 22 号 B-1, 1979, p.157-204
- 11) 大角恒雄: 振動センサーによる土石流検知システムの構築に関する一考察, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 2004, (投稿中)
- 12) 林・尾崎・和泉: 掃流砂量と掃流砂量の遅れの距離について, 水理講演会論文集, 第 25 巻, 1981, pp. 9 - 19.
- 13) 佐藤春夫: 地震波のエンベロープ解析: 現状と今後の課題, 物理探査, 第 51 巻, 1998, pp.453-470.
- 14) 小原一成: S 波エンベロープ拡大現象, 地震, 第 2 輯, 第 54 巻, 2001, pp.159-170.
- 15) Hadley, K.C., and LaHusen, R.G., Technical manual for an experimental acoustic flow monitor: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-114, 1995, 25 p.
- 16) Dorava, J.M., and Meyer, D.F., Hydrologic hazards in the lower Drift River basin associated with the 1989-1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 62, 1994, pp. 387-407.

(2004. 6. 18 受付)