

# 野尻川における土石流振動特性の変化 に関する一考察

## INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS WITH TEMPORAL CHANGE IN FOURIER SPECTRUM IN A FLOW CONDITION USING VIBRATION SENSORS: CASE STRUDY ALONG NOJIRI RIVER

大角 恒雄<sup>1</sup>・浅原 裕<sup>2</sup>・下川 悦郎<sup>3</sup>

Tsuneo OHSUMI, Hiroshi ASAHARA and Etsuro SHIMOKAWA

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

E-mail: a3850@n-koei.co.jp

<sup>2</sup> 株式会社 先端力学シミュレーション研究所 (〒351-0104 埼玉県和光市南 2-3-13-402)

E-mail: asahara@astom.co.jp

<sup>3</sup> 鹿児島大学農学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-24)

E-mail: sabos@agri.kagoshima-u.ac.jp

**Key Words:** *automatic detection, debris flows, landslides, vibration sensor, Nojiri River*

### 1. はじめに

公共投資が減少する現在, 想定を上まわる災害に対応するには, ハード的対応の他にソフト的対応が重要となる. このような社会情勢において, 災害を軽減するためには砂防施設の配置に加え, 警戒避難対策のための土石流の発生を検知することが必要となる. その手段の一つとして, 土石流の流下を確実に自動検知し, リアルタイムに情報を伝達するシステムが有効である. 本研究では, 2004年から2005年まで鹿児島県桜島の野尻川5号えん堤付近に振動計を設置し, 幾つかの土石流による振動波形の記録を得た. その中でワイヤーセンサー切断規模の土石流に対応する振動波形記録が CCTV(Closed-circuit Television)画像と共に観測された. 2004年7月10日の振動センサーデータに対して行われた土石流・地震・ノイズ識別手法の自動化<sup>1)</sup>を2005年10月4日の事象にも適用し, 野尻川で得られた振動観測記録の識別検証を実施した. また, この中で明らかになった卓越振動数の変化のメカニズムに関する一考察を見出したので, ここに報告する.

### 2. 対象地域施設概要

桜島は鹿児島県の中央にある周囲約52 km, 面積約80 km<sup>2</sup>の円形の火山島である. 島内には北岳(1,117 m), 中岳(1,060 m), 南岳(1,040 m)の3つの峰があり, そのうち南岳は盛んに噴火活動を続けており, 最近では2007年1月2日に爆発し, 高さ約2,500 mまで噴煙を上げた. 2008年2月3日には3回の噴火が発生し, 3回目(15:54)の爆発的噴火では火砕流が発生した<sup>2)</sup>. 南岳は振動計を設置した野尻川の土石流源頭部に位置する. 桜島には計18の溪流があり, その流域面積はいずれも小さく, 河床は急勾配をなし, 普段は枯れ河川という特徴がある. 流域斜面は火山砕屑物から構成され, ガリー浸食が進んでいる. 土石流の発生件数が最も多いのは野尻川であり, その件数は1976年から2007年までの間の年平均で16回にも及ぶ<sup>3)</sup>. また, 各溪流は山麓に向かって放射状に発達し, 土石流・泥流が流下すると, 規模によっては下流で広く氾濫して堆積し, 広範囲にわたり被害をおよぼす. 土石流災害を防ぐため, 建設省大隅工事事務所(現国土交通省大隅河川国道工事事務所)では, 土石流の検知を目的としたセンサーを数多

く設置し、観測が継続されている。

土石流は一般的に、①河床堆積物の移動型、②崩壊型、③河道閉塞決壊型、④地すべり型、⑤火山活動型に分類される。⑤火山活動型は、「狭義には火山爆発、地震によって起こる土石流を指すが、広義には活火山地域で起こる土石流を指す」と定義されており<sup>4)</sup>、野尻川の土石流はこれに属する。さらに「火山泥流もこれに属し、組成的に細粒分に富み、流動性が非常に高く、小降雨でも容易に発生するのが特徴である」とされている。野尻川では、有効雨量が 10 mm 以上、有効雨量強度が 5 mm/hr、最大 10 分間雨量が 5 mm 以上と、一般の溪流に比べ小さな雨量で土石流が発生する<sup>5)</sup>。これは斜面を覆った火山灰が浸透能を低下させ、表面流の発生を助長することに起因する。土石流は土砂組成を基準とすると、石礫型と泥流型とに分類できるが、野尻川の土石流にも両タイプが存在する。

### 3. 観測機器概要

振動センサーは野尻川 5 号えん堤付近と、野尻川流下方向に 2 基設置した(図-1)。振動センサーは、通常の地震計よりも高い振動数(100 Hz 前後まで)を検知できる広帯域の感知精度を有し、サンプリング間隔は 1/500 秒とし、地盤振動を基礎を介さずに直接計測できるポアホールタイプサーボ型振動計(東京測振:SV355 改良型)である。振動計の方向成分は上下流方向を X、上下流直交方向を Y、鉛直方向を Z とした。

### 4. 観測記録

#### (1) 土石流発生情報

野尻川 5 号えん堤付近での振動波形観測事例を以下に示す。7 号えん堤に高さ方向に 60 cm ピッチで張られたワイヤーセンサーの 1 段、2 段、3 段が切断した規模の事象のうち、監視カメラの CCTV 画像が残っている事象として、2004 年 7 月 10 日 02:04:36(継続時間約 40 分間)の観測波形(図-2)、2005 年 10 月 4 日 12:10:15(継続時間約 45 分間)の観測波形(図-3)の鉛直(Z)成分の 2 波形を対象とした。この 2 波にそれぞれのワイヤーセンサー切断時刻をプロットする。それぞれ、トリガー起動した後、連続的に振動レベルが増加する土石流特有の観測波が得られ、初期の段階でワイヤーセンサーが切断されている。

(2) 振動数特性 土石流の振動特性を示した振動センサーの観測波形の解析を述べた論文は幾つか報告されており、筆者らの論文<sup>1),6)</sup>でも諏訪らの文献<sup>7)~11)</sup>を紹介した。諏訪・山越ら<sup>8)~11)</sup>は、石礫型土石流の典型

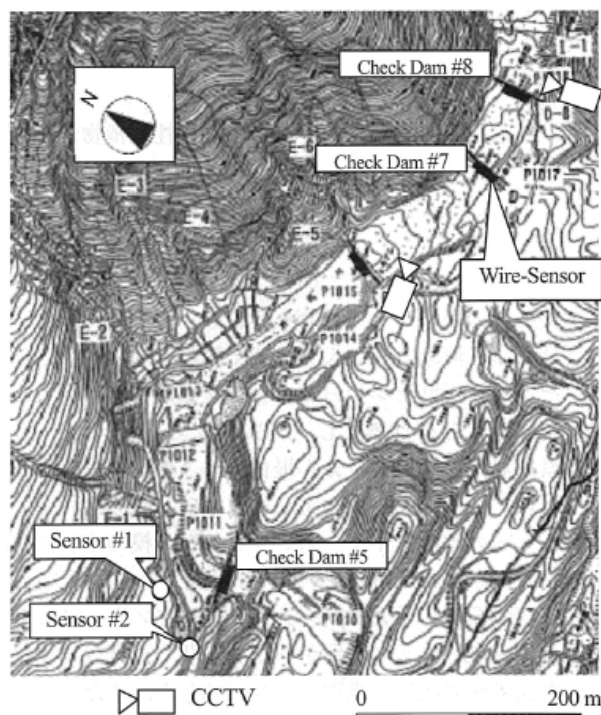


図-1 野尻川振動センサーとワイヤーセンサー設置位置

である焼岳での土石流において、先頭部の接近時には振動の卓越振動数が 20~30 Hz の帯域に、先頭部が観測点を通り過ぎて遠ざかるときには、40~60 Hz の帯域に移行することを報告している。なお、計測機器設置時に野尻 5 号えん堤位置での降雨による振動を測定したところ、30 Hz 以下であった。

ここでは、トリガー起動後の観測波形の卓越振動数の変化を把握するために、観測波全体にフーリエ・スペクトル解析を実施し、振動数の変化とワイヤーセンサーが切断された時刻との対応を試みた。対象とした事象は、2004 年 7 月 10 日の感度の良好な下流側(Sensor#2)の振動波形のフーリエ・スペクトル(図-2)である。

これより、土石流流下中に卓越振動数が変化することがわかった。

- 1) 02:04- 02:11, 02:19 - 02:34 間に 150 Hz を超える高振動数が存在する。
- 2) 02:11-02:19 間に 8 分間静穏期が存在する。
- 3) 02:34 には 10-30 Hz の低振動数側に卓越振動数がシフトする。高振動数成分が消滅する。
- 4) 低振動数側に卓越振動数がシフトし、スペクトル強度が増加する時刻付近でワイヤーセンサーが切断されている。

上記現象は、大隅河川国道事務所 HP<sup>12)</sup>に 20 分間の CCTV 画像として事象発生後 1 年間公開されている。この土石流による振動波形が記録されたのは午前 2 時頃であるが、この時間帯には落雷が頻発しており、雷光が瞬時に照らす瞬間のみ監視カメラが、8 号えん堤を流

下する土石流を記録している(図-2 下図). この画像と対比すると、振動センサーがトリガー起動した直後の高振動数が卓越している時刻では、小規模な泥水状の流れが流下している(図-2 下図 ①, ②). また、この初期の8号えん堤付近では、右岸側を泥水状の流れが流下している. ワイヤーセンサー1段、2段が切断された時刻02:34では水量が急激に増加し、8号えん堤上流で右側に屈曲した河道を流れてきた土石流が映像手前の左岸側に衝突している(図-2 下図 ③, ④, ⑤). この時刻は、卓越振動数が高振動数から低振動数にシフトした

時刻に対応する. また、振動波形にみられる02:50付近の振幅増幅が画像には残っていないが、02:46では水量が増加し土石流段波(Surge)に形成されてゆく状況が映像で確認された. この事象は、ワイヤーセンサーでは検知できないが、振動波形からは流量が増加したことが推測される.

2005年10月24日12:10:15(図-3)においても下流側センサー(Sensor#2)が泥流の流れ込み等によって破損した状態であったため、上流側(Sensor#1)の観測波形において高振動数から低振動数側に卓越振動数がシ

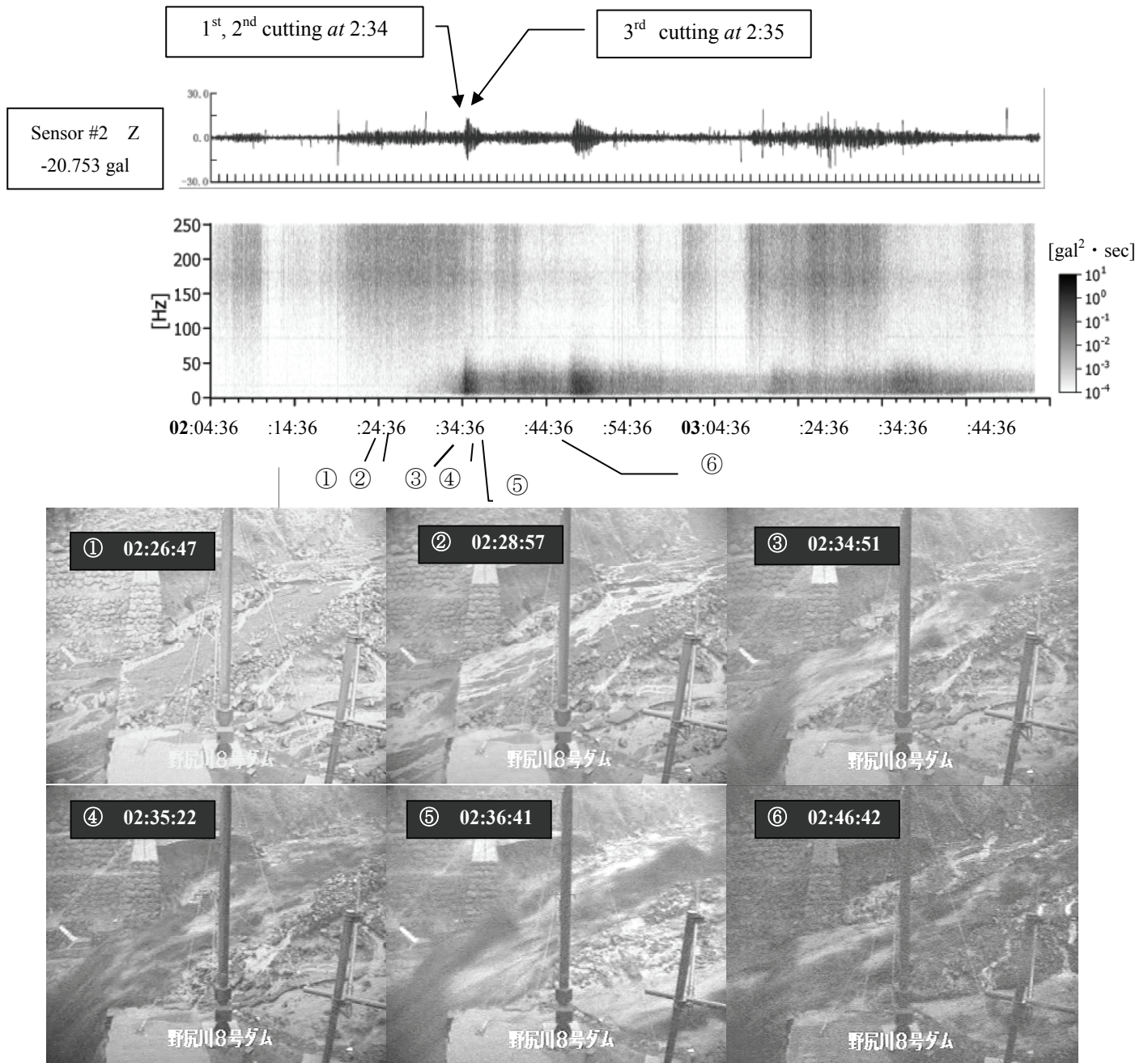


図-2 フーリエ・スペクトル(起動時刻:2004年7月10日2時4分36秒~46分46秒) 継続時間:40分間と8号監視カメラ映像 \*波形内の矢印はワイヤーセンサーの切断時刻 \*\*フーリエ・スペクトルの番号は8号監視カメラ映像に対応

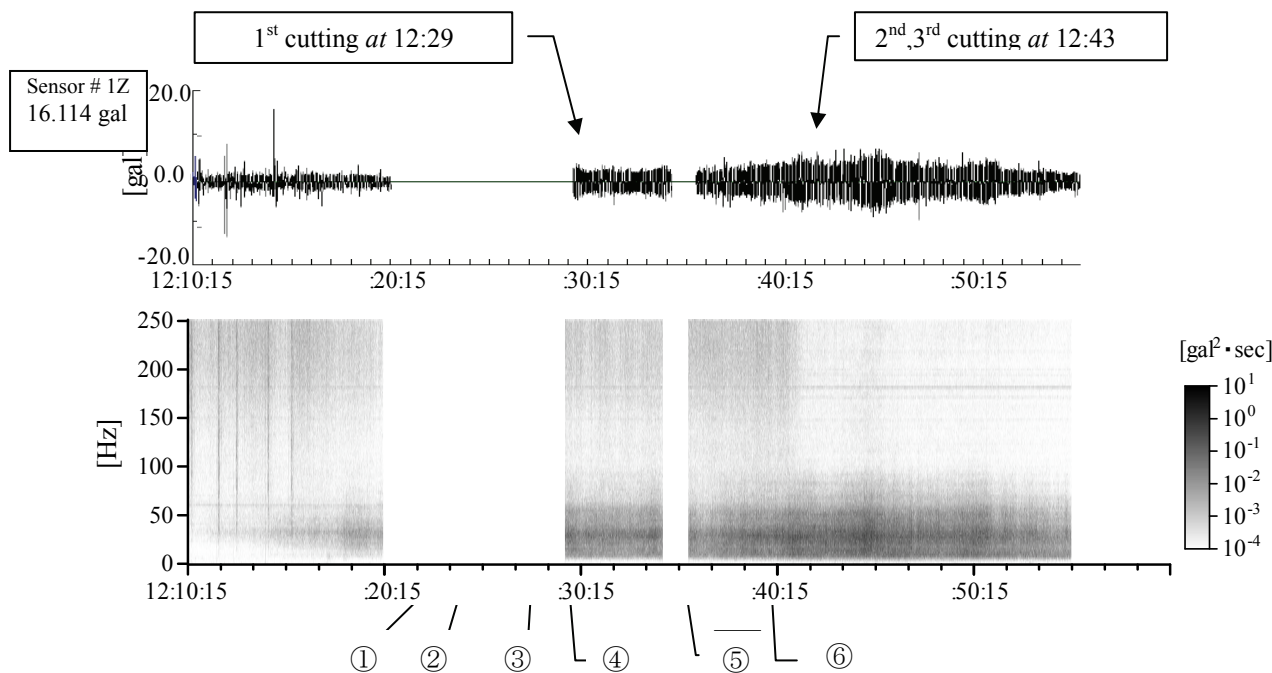


図-3 フーリエ・スペクトル（起動時刻:2005年10月4日12時10分15秒）継続時間:約45分間  
と8号監視カメラ映像 \*波形内の矢印はワイヤーセンサーの切断時刻  
\*\*フーリエ・スペクトルの番号は8号監視カメラ映像に対応

フトし、スペクトル強度が増加する時刻の立ち上がり部分とワイヤーセンサーの切断時刻とが一致するといった同様な傾向がみられる。この事象では、トリガー1,200秒後(12:30頃)に高振動数から低振動数側にシフトする。この場合は、やや高振動数成分が残っているがワイヤーセンサーの2段、3段が切断された時刻(12:43)には、高振動数成分は急激に減少する。この時の画像も記録されている(図-3下図)。この事象では、上記2004年7月10日の様な急激な水量の増加はない。卓越振動数帯の傾向が高振動数から低振動数に変化する傾向は

同じであるが、2004年7月10日の記録ほど振動数のシフトは明瞭でない。ただし、ワイヤーセンサーの3段目の高さまで増水した時刻12:43以降では高振動数は消滅する。この特性を利用すれば、振動センサーで、その規模の段波が継続しているかどうかを検知できることとなる。

## 5. エンベロープ

周波数特性を定量化する目的で、エンベロープを適用する。エンベロープとは振動の包絡形状を表すもの

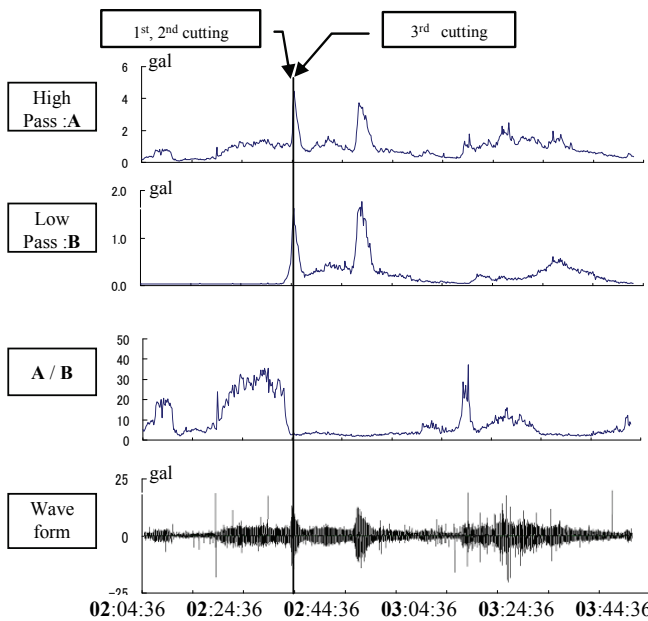


図-4 エンベロープ比 :A/B (起動時刻:2004年7月10日 2時4分36秒)

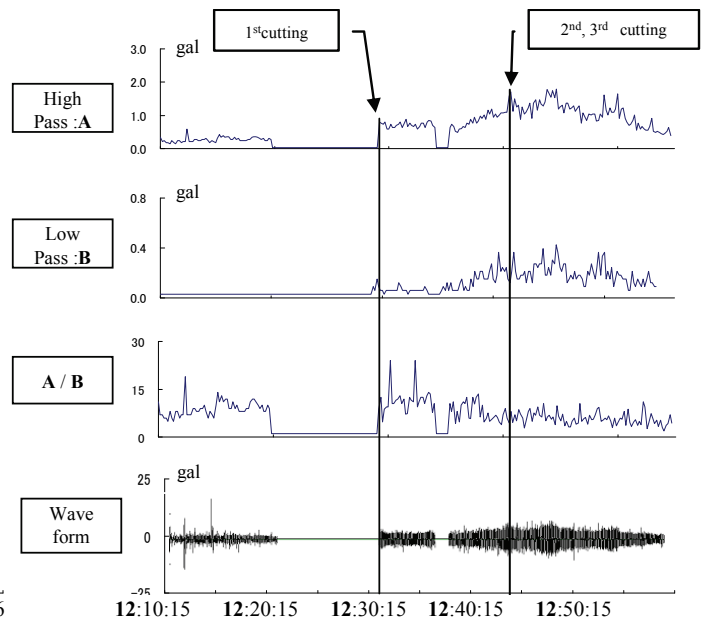


図-5 エンベロープ比 :A/B (起動時刻:2005年10月24日12時10分15秒)

である。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、振動記録の平方根からエンベロープを算出した。10 Hz 以下遮断のエンベロープ値 A と 10 Hz 以上遮断のエンベロープ値 B の比であるエンベロープ比(A/B) が大きな値となるときは、高振動数が卓越し、小さな値となるときは、低振動数が卓越することを意味する。2004年7月10日02:34の観測記録のエンベロープ比を図-4に示す。エンベロープ比の大きな時間帯は、土砂流通直後に現れ、ワイヤーセンサー切断時前に収束する。一方、他地点の恵山の事例<sup>5)</sup>から観測期間中発生したすべての地震でエンベロープ比は1を超えない値であるので、土石流の地震との識別は容易である。さらに、10 Hz 以上遮断のエンベロープ値 B のエンベロープ波形の卓越時刻はワイヤーセンサー切断時刻 02:34 と一致するので、切断時刻を知ることが可能となる。

ここで、遮断周波数は 10 Hz とした。これは、桜島の土石流による振動と火山性微動が、8 Hz を境に大小傾向が逆転し、土石流が高振動数側で卓越する<sup>11)</sup>ことと、恵山の事例<sup>6)</sup>ではエンベロープ比の比較検討で 10 Hz を境にフィルタリング処理を施すとで、土石流と地震との識別判定結果が良好であったことに基づくものである。

センサーの起動はワイヤーセンサー切断の 30 分前であるのでエンベロープ比が 10 を超える時刻 02:19 が、ワイヤーセンサー感知以前における小規模な泥水状の流れ(掃流状集合流動)の開始時刻に対応する。また、10 Hz 以上遮断のエンベロープ値 B が 1 gal を超えるとワイヤーセンサー切断時刻に対応する。

この特性をワイヤーセンサーに代わる利用方法として、閾値を設けるとすると、以下のことが考えられる。

- 1) 常時振動を観測し、振動の大きさが一定レベルを超えるとエンベロープの演算処理を自動的に実施する。
- 2) エンベロープ比がある値(たとえば 1)を超える閾値で地震と区別する。
- 3) 継続時間(たとえば 10 秒以上)によって、ノイズと区別する。
- 4) ノイズでないと判断されれば、ワイヤー切断の警報を画面上に表示する。

上記現象は、2005年10月24日の記録(図-5)では、1段目のワイヤーセンサーの切断時刻 12:29 にはこの直前の振動波形がトリガーレベルより小さく存在していないため議論できないが、2, 3 段目のワイヤーセンサー切断時刻 12:43 には、同様な傾向が生じている。

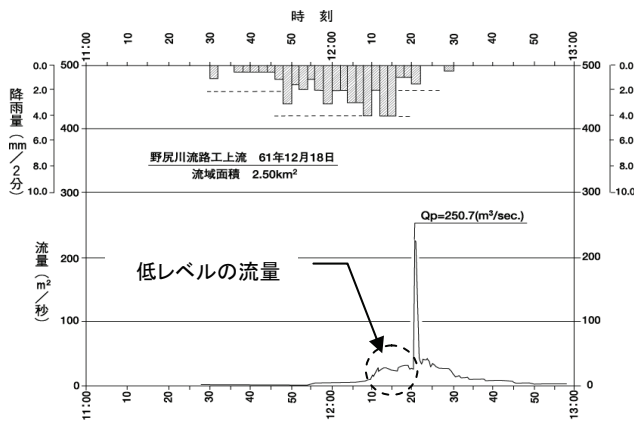
## 6. 土石流の流動機構と振動数の変化

上記、周波数特性の変化と CCTV 画像を対比した結果、以下の特性が得られた。

- 1) 振動センサートリガーが起動した直後の高振動数が卓越している時刻では、小規模の泥水の流れである。
- 2) ワイヤーセンサーの切断した直後の低振動数が卓越している時刻では、段波(Surge front)をもつ規模の大きな土石流が流下している。
- 3) 卓越振動数の変化が生じる事象は土石流段波が通過する時刻に対応する。

1) に示した小規模の泥水の流れは、野尻川で 1986 年に観測された土石流のハイドログラフ<sup>5)</sup>を例にとると、ピーク流量が発生する以前に発生した低レベルの流量(図-6 破線円内)に相当することが考えられる。

寺本<sup>13)</sup>らは流出過程を次のようにモデル化している。まず流域に降った雨のうち損失雨量と浸透能値を越え



**図-6 野尻川土石流のハイドログラフ  
桜島の土石流, 建設省 九州地方建設局大隈工  
事事務所(1986年12月18日)**

た部分が表面流(ホートン型表面流)を発生させ、それが低所集中しながら流量を増大させ流下する過程で表面を削り取ることによって土石流を誘発する。

この考え方を参考に野尻川における現象を説明する。まず降雨で表面水が発生する。次に、表面水は不透水層まで浸透して、溪流の堆積土砂を飽和させて流動化し、土砂濃度と粒度を増加させながら流体の運搬能力を増加し、段波形状を呈した土石流が発生すると考えられる。

泥水状の流れでは、細粒の土砂を含む流体が溪床・溪岸に衝突することによって地盤振動が生じているのに対し、土石流本体は粒径の大きな溪床堆積砂を巻き込んだ流動であり、大径礫が溪床や溪岸に激しく衝突することによって地盤振動が生じていると考えられる。この機構の変化が、卓越振動数を高振動数から低振動数に変化させる要因と考えられる。

## 7. まとめ

桜島野尻川 5 号局舎に設置した振動計で計測した観測波形から求まるパラメータを、泥水状の流れと土石流を識別するために適用して検討したところ、以下の点が明らかとなった。

- 1) 観測記録の振動数特性は、ワイヤーセンサーの切断時刻において、低振動数側に卓越振動数がシフトし、スペクトル強度が急激に増加する。
- 2) 振動数特性の変化と CCTV 画像を比較した結果、振動センサートリガーが起動した直後の高振動数が卓越する時間帯に小規模な泥水状の流れが流下し、卓越振動数が低振動数へシフトする時刻は土石流段波が通過しワイヤーセンサーが切断する時刻に対応していた。
- 3) 卓越振動数のシフトは、掃流砂礫の粒径が細粒から粗粒へ変化することに起因するものと考えられる。
- 4) エンベロープ値の最大値時刻とワイヤーセンサー切断時刻が対応していることから、リアルタイムにモニター

することで、管理事務所でもワイヤーセンサー切断規模の土石流発生を振動センサーから知ることが可能となる。さらに、ワイヤーセンサー切断規模の土石流が継続していることも、管理事務所で行うことができる。

5) エンベロープ比を用いることで、ワイヤーセンサー感知以前の小規模な泥水状の流れの発生時刻を捕らえることが可能である。

謝辞：国土交通省大隅河川国道事務所には観測地点の提供、土石流発生情報、CCTV 画像等、貴重なデータ提供をいただいた。ここに記して御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 大角恒雄, 浅原裕, 下川悦郎:野尻川における振動センサーを用いた土石流検知自動判定システムに関する一考察, 砂防学会誌, Vol.61, No.1, 2008, pp.3-10.
- 2) 2008年2月3日～6日の桜島昭和火口噴火の状況, 京都大学防災研究所火山活動研究センター  
[www.dpri.kyoto-u.ac.jp/~kazan/sakurajima/sakura08.html](http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/~kazan/sakurajima/sakura08.html)
- 3) 大隅河川国道事務所 HP, 桜島の防災情報  
<http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/sabo/jyouhou/jyouhou.htm>
- 4) 谷口義信:土石流の発生, 流動, 堆積の理論, 新砂防工学, 朝倉書店, pp.73-83, 2001.
- 5) 桜島の土石流, 建設省 九州地方建設局 大隈工事事務所, 昭和 63 年 3 月
- 6) 大角恒雄, 長山孝彦, 楨納智裕: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, 2006, pp.29-34.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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, No.26, 1999, pp.124-129.
- 10) 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.
- 11) 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, pp.157-2041.
- 12) 大隅河川国道事務所 HP, 最近の土石流映像,  
<http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/sabo/nayami/kakomovie.htm>
- 13) 寺本行芳, 下川悦郎, 地頭蘭隆:雲仙普賢岳水無川流域における土石流の流出過程の経年変化, 砂防学会誌, Vol.56, No.3, 2003, pp.3-11.

(2008. 5. 16 受付)