

地震計データを用いた土石流発生検知手法の検討

STUDY ON GROUND VIBRATION INDUCED BY DEBRIS FLOW WITH SEISMOMETER DATA

二瓶泰雄¹・新川皓太²

Yasuo NIHEI and Kota SHINKAWA

¹正会員 博(工) 東京理科大学教授 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科(同上)

A specific ground vibration was observed when huge sediment disaster occurred in Izu Ohshima, in Oct., 2013. However we have poorly understood relationship between ground vibration and debris flow. In this study, we examined fundamental characteristics of ground vibration induced by debris flow and slope failures. For this, we analysed data set of ground vibration measured by seismometer at Izu Ohshima and Nigiso during the sediment disaster. The results indicated that the energy spectral of ground vibration in debris flow and slope failures was dominant in 1 - 10 Hz in Izu Ohshima and 10Hz- in Nagiso, respectively. This difference is due to that of the distance between the seismometer and occurrence of debris flow.

Key Words : *sediment disaster, debris flow, ground vibration, mitigation, evacuation*

1. 序論

近年, 異常豪雨による土砂災害が各地で頻発している。例えば 2013 年東京都大島町では, 夜間に 100mm を越える時間雨量が 4 時間連続で記録し, 総雨量 824mm の降雨に伴い大規模土石流(泥流)が発生し, 死者・行方不明者数 39 名の被害が生じた¹⁾。また, 2014 年 8 月広島市では, 夜間に記録的短時間豪雨が発生し, 多くの沢にて土石流が発生し, 死者 74 名という記録的な土砂災害が生じた²⁾。土砂災害を防ぐには, 砂防堰堤建設等のハード対策のみならず, 土石流発生の予測技術の高度化や信頼性の高い避難予警報発令等のソフト対策の充実が必要である。

土砂災害に関する予警報の判断材料としては, 降雨量データから得られる土壌雨量指数や, 累積雨量と時間雨量の相関図と過去の土砂災害発生状況に基づく土砂災害発生危険基準線(CL ライン)が用いられる³⁾。いずれも降雨データを用いるため, ある一定の信頼度があるものの, 上述した伊豆大島や広島の土砂災害時のように, 非常に狭い範囲での短時間豪雨を精緻に予測することは現状でも容易ではなく, 降雨のみに依存する土砂災害予警報システムの精度向上には限界がある。

一方, 土石流災害では土石流が一波のみ発生するわけではなく, 数波以上にわたり土石流が発生する。例えば, 2013 年伊豆大島では, 火山監視用の震動計により常時微動や地震動とは明確に異なる土石流発生に伴う震動が約

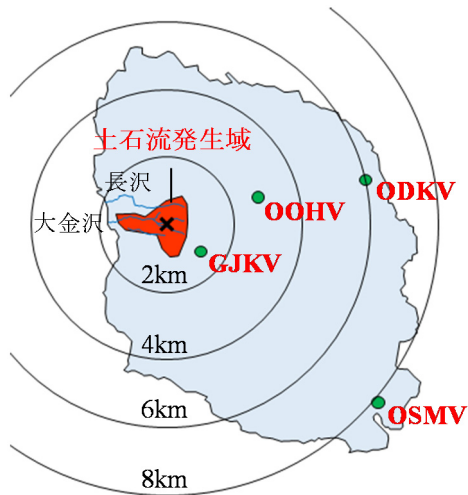
1 時間半の間に 6 回記録された¹⁾。この土砂災害では, 一波目の土石流よりも, 二波目以降の土石流の規模が大きく人的被害も大きかったとされている。一波目の土石流だけでも検知し, 近隣住民や関係行政機関に周知できれば, それ以降の被害を軽減できた可能性が高い。そのため, 地震計や加速度計などにより計測する地盤振動データから, 土石流やその元となること多い斜面崩壊等を起源とする地盤振動を検知し得る技術が強く求められている。

土砂移動に伴う地盤振動計測は, これまで数多く行われており, 一部は, 実務レベルでの検討も進められている^{4)~8)}。その多くは土石流が発生した溪流脇に振動センサーが設置されていることが多く^{4)~7)}, 土石流発生源から 1km 以上離れた位置における土石流検知の検討例は少ない。また, 遠方の土砂移動検知も検討されているが⁸⁾, 対象が深層崩壊などの大規模土砂移動であり, 伊豆大島や広島のような表層崩壊を観測対象としている事例は少ない⁹⁾。さらに, 土石流に伴う地盤振動を地震やノイズと区別する手法も提示されているが^{6), 7)}, 対象事例が少なく今後の更なる検討が必要である。

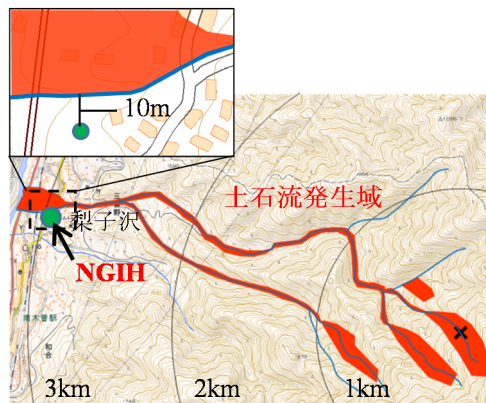
本研究では, 2013 年伊豆大島と 2014 年長野県南木曽の土石流発生時における地震計データを用いて, 土砂移動発生時における地盤振動の基本的特徴を明らかにする。地震計と土石流発生域の距離は, 伊豆大島では 1km 以上離れている一方, 南木曽では近接している(数十 m 以内)。これらの結果に基づいて, 土石流発生検知手法を検討す

表-1 解析で用いる地震計の概要

サイト	観測地点	地震計種類	計測深度 [m]
伊豆大島	GJKV (御神火茶屋)	短周期	78
	OOHV (大島温泉ホテル)	短周期・広帯域	76
	ODKV (大島動物公園)	短周期・広帯域	50
	OSMV (大島波浮)	短周期	101
南木曽	NGIH (南木曽)	短周期	105



(a)伊豆大島



(b)南木曽

図-1 地震計設置位置と土石流発生範囲

る。

2. 研究方法

(1) 対象の土砂災害の概要

本論文において対象とする土砂災害の概要を示す。まず、2013年伊豆大島では、大型で非常に強い台風26号が、10月16日未明に伊豆諸島や関東地方を通過し、東京都大島町大島アメダス観測所では最大の時間雨量118.5mm、累積824mmの豪雨が観測された。これにより、伊豆大島西部の元町地区を中心として大規模な土石流が発生し、死者36名、行方不明者3名であった¹⁾。家屋被害としては、全壊137棟、大規模半壊28棟、半壊49棟となった¹⁾。家屋被害は全壊が突出し、局所範囲にて甚大な家屋被害が集中するのが土砂災害の特徴である¹⁰⁾。今回の土石流は、図-1(a)に示す大金沢、長沢、八重沢等で生じたが¹⁾、甚大な人的・物的被害は大金沢流域に集中していた。この土砂災害における被災状況の時間的推移に関しては¹¹⁾、10/16 2時頃から元町中心部から山側の神立地区で被害が

発生し、その後徐々に被害は海側へ拡大した。さらに、3時前後から大金沢沿いの家屋にも被害が発生し、4時ごろまで続いた。

長野県木曽郡南木曽町での土砂災害は、2014年7月9日同日17時40分頃に発生した¹²⁾。この時には、時間雨量が最大で57mm、累積で約116mmの降雨が観測され、図-1(b)に示す梨子沢にて土石流が発生した。この土石流により、死者1名、負傷者3名、家屋被害は全壊10棟、一部損壊3棟であった。

(2) 用いる地震計データについて

本論文の対象サイトである伊豆大島には気象庁を始め様々な研究機関の地震計が設置されているが、ここでは、図-1(a)に示すように、防災科学技術研究所により設置されている地震計のデータを用いる。これらのデータは、Hi-net高感度地震観測網¹³⁾のHPよりダウンロードして入手している。伊豆大島内の観測地点は、御神火茶屋(GJKV)、大島温泉ホテル(OOHV)、大島動物公園(ODKV)、大島波浮(OSMV)の4箇所であり、それぞれ大金沢流域の土石流発生地点(便宜的に図-1(a)の×印に設定)から1.5, 3, 6, 8kmに位置している。各観測点における観測概要を表-1に示す¹⁴⁾。使用機器は、短周期地震計及び広帯域地震計であり、短周期地震動のみならず、火山性微動やマグマ活動に起因する長周期の地震動にも対応可能である。広帯域地震計は地表面付近に設置されるが、短周期地震計は地表面におけるノイズの影響を排除するために、地面から50～100m程度の深さに設置されている。また、計測項目は、上下・東西・南北三方向速度であり、計測周波数は100Hzである。

一方、南木曽では、高感度地震観測網(Hi-net)の地震計データを用いる。南木曽では、図-1(b)に示す1地点(NGIH)であり、短周期地震計が用いられている。

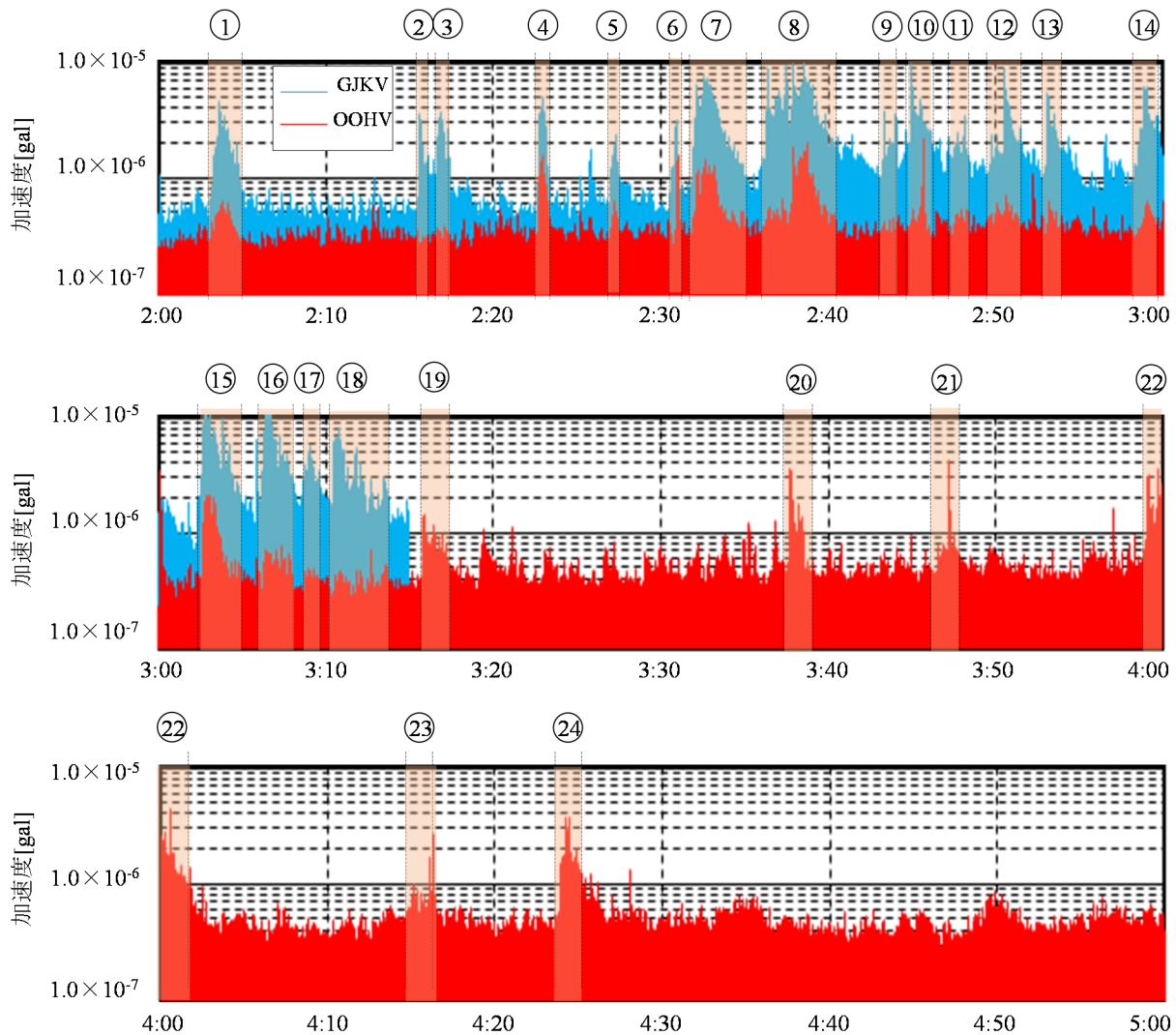


図-2 土石流等発生時におけるGJKV地点（御神火）とOOHV地点（大島温泉ホテル）における上下方向加速度絶対値の時系列データ（図中の番号は土砂移動発生イベント番号を示す。GJKV地点では3時15分以降欠測のためNo dataとなっている）

(3) データ解析対象・方法

データ解析対象としては、伊豆大島では土石流発生時（2013/10/16 2:00-5:00）と地震時（2011/3/11 14:30-15:30），常時微動のうち振動レベルが低いものを5個，高いものを5個（各データはいずれも60分間）とする。南木曾に関しても，土石流発生時（2014/7/9 17:00-18:20）及び地震時（2011/3/11 14:30-15:30），常時微動（振動レベル大・小それぞれ6個ずつ）とする。これらの地震計データを，各地震観測網 HP からダウンロードし，加速度の時系列生波形を作成する。土石流発生時データに関しては，加速度において閾値を設定し，加速度がその閾値を20秒以上上回るものを土砂移動イベントと認定し，各イベントについてスペクトル解析を行った。同様のデータ整理を常時微動・地震動に関しても実施する。

また，既存の土石流検知手法の一つとして，加速度に基づくエンベロープ比 E が用いられる⁹⁾。このエンベロープ比とは，地盤振動データに対して，低周波数帯と高

周波数帯における振動データの大きさの比を取ったものであり，次式のように定義される。

$$E = \frac{a'_{High}}{a'_{Low}} \quad (1)$$

ここでは， a'_{High} と a'_{Low} は高周波 (>10Hz) と低周波 (<10Hz) の加速度変動成分のRMS値であり，エンベロープ比 $E > 10$ が土石流発生とされている。

3. 結果と考察

(1) 土石流発生時における地震計の生データの特徴

土砂移動発生時における地震計により得られた3方向の速度データを確認したところ，地盤振動の卓越方向などは見られなかった。そこで，上下方向速度データから変換された上下方向加速度の絶対値について，伊豆大島を例として，2013/10/16 2:00～5:00の時系列データを図-2に示す。ここでは，土石流等発生時に常時微動と異なる地

盤振動が確認されたGJKV地点（御神火）とOOHV地点（大島温泉ホテル）のみの結果を表示している。土石流発生地点から6.5km離れたODKV地点及び8.5km離れたOSMV地点までは土石流起源の地盤振動は到達せずに減衰したものと考えられる¹⁾。また、土石流発生地点に近いGJKV地点では当日3:15以降はデータ欠測したことに注意されたい。

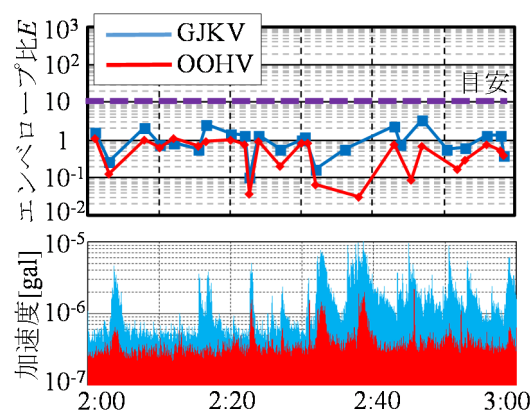
この図より、両地点における常時微動の加速度絶対値はGJKV地点では 6×10^{-7} [gal]程度、OOHV地点では 2×10^{-7} [gal]程度であるが、それを大きく上回る加速度シグナルが多く観測されている。これらのデータから土石流等の発生イベントを抽出するために、GJKV地点のデータが存在するときには加速度が 2.0×10^{-6} [gal]を上回るとき、GJKV地点の欠測時にはOOHV地点の加速度が 1.0×10^{-6} [gal]を上回るときに、それぞれ便宜的に土砂移動発生と見なした。また、例えば加速度データが上記閾値を越えてもスパイクノイズ（継続時間が0.05s以下）のようなデータには土砂移動イベントは無いものとした。加速度が閾値をある一定時間（20秒以上）下回るときに土砂移動イベント終了とした。これより以下のことが分かる。

- ① 土石流等の発生に起因すると考えられる地盤振動の加速度シグナルが多数記録されており、少なくとも合計で24イベントが観測されている。
- ② イベント毎に加速度データの大きさやその継続時間が大きく異なり、その様子は大金沢に近いGJKV地点において明確である。
- ③ 各イベントでは、加速度シグナルの増減が短時間で終わるケース（イベント②，③，④など）や、加速度振幅が急激に上昇し、その後、緩やかに減少するケース（イベント⑦，⑧，⑮など）が見られる。
- ④ 土石流等の発生由来と考えられる加速度シグナルが大金沢に近いGJKV地点では見られるものの、やや遠いOOHV地点において全イベントにて同様な加速度シグナルが見られるわけではなく、常時微動とほぼ変わらないイベントも散見される。

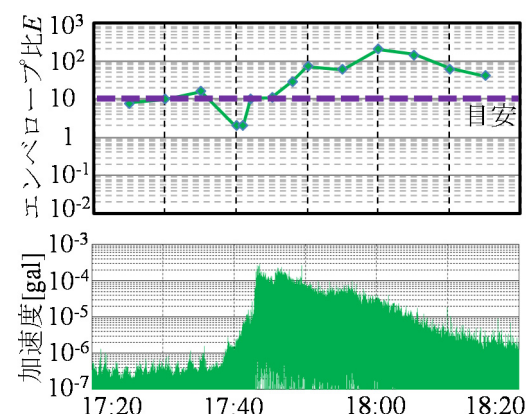
これらの地盤加速度振幅の大きさや継続時間がイベント間及び地点間で異なることは、土石流等の発生状況・場所の違いを反映しているものと推察される。

(2) エンベロープ比の特徴

土石流発生時及びその前後におけるエンベロープ比 E の様子を把握するために、エンベロープ比 E の時間変化を図-3に示す。ここでは、伊豆大島 GJKV 地点・OOHV 地点の2013/10/16 2:00~3:00と南木曽の2014/7/9 17:20~18:20の結果を図示する。合わせて加速度絶対値の時間変化も表示する（伊豆大島に関しては再掲）。エンベロープ比に関しては、土砂移動等に由来するイベント時のその前後の結果を不定期に算出している。なお、伊豆大島では、前述したように土砂移動発生に起因すると考えられる地盤振動の加速度シグナルが多数記録された。一方



(a)伊豆大島（GJKV・OOHV, 2013/10/16）



(b)南木曽（NGIH, 2014/7/9）

図-3 土石流発生時におけるエンベロープ比 E (上) と加速度絶対値 (下) の時間変化 ($E=10$ より大きいと土石流発生の目安とされている⁹⁾)

で南木曽では、土石流に伴う地盤振動のイベントが一つしか記録されていないが、その最大値は 3.0×10^{-4} [gal]と伊豆大島・GJKV 地点 ($=1.0 \times 10^{-6}$ [gal]) より1オーダーも大きく、イベント継続時間も約1800sと伊豆大島 (=最大230s) の約6倍に相当する。これらの差異は、土石流等の発生場所と地震計設置位置の距離が大きく関係しているものと考えられる。

図-3に示すエンベロープ比に着目すると、伊豆大島の2地点では、加速度振幅が大きくなっている土石流発生時におけるエンベロープ比 E の方が、その前後の常時状態よりも小さくなっており、土石流等発生時のエンベロープ比 E はGJKV 地点では0.10~3.41, OOHV 地点では0.04~0.90といずれも土石流発生の目安である10を下回っていた。一方、南木曽のエンベロープ比 E は土石流発生前の17:35以前では8~10であるが、土石流到達直前の17:40~17:43には E は2前後に大きく減少し、土石流到達後には E は10以上となり、最大200まで達した。このように、土石流発生時には、 $E > 10$ を満たしており、既存研究⁹⁾と類似の結果が得られた。なお、土石流発生直前の時間帯では、梨子沢内にて豪雨に伴う洪水流が生じていたもの

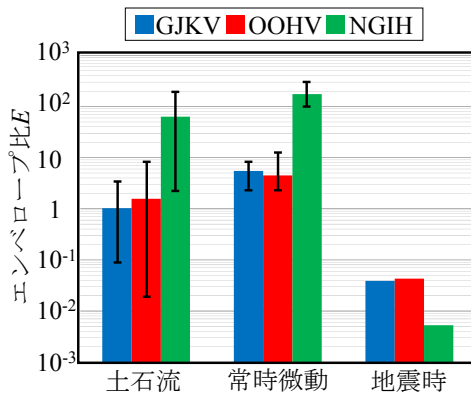


図-4 各地点におけるイベント別エンベロープ比 E の平均値±標準偏差の比較

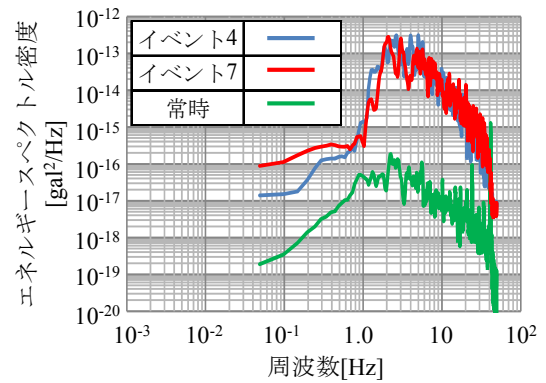
と思われるため、この時の $E \approx 2$ というのは洪水発生時の地盤振動やエンベロープ比を表すものと推察される。

エンベロープ比 E をより定量的に比べるために、各地点におけるイベント別のエンベロープ比 E の平均値±標準偏差を図-4に示す。ここでは、伊豆大島の GJKV・OOHV 地点と南木曽の NGIH 地点を対象に、土石流発生時、常時微動時、地震時に分けて表示している。なお、常時微動では振動レベルの高いデータを対象とし、地震時は一イベントのみなので標準偏差は表示していない。これより、まず、南木曽・NGIH 地点では、土石流発生時のエンベロープ比 E は地震時より大きく、かつ、10以上となり、従来の研究⁶⁾と同じ土石流検知手法を適用できる。一方で、伊豆大島の2地点では、土石流発生時の E は地震時よりも大きいものの、平均値+標準偏差でも10を下回り、これまでのエンベロープ比 E の閾値のみでは土石流検知が難しい。なお、両サイト共に常時微動と土石流発生時のエンベロープ比が類似し、エンベロープ比のみでは常時微動とは区別し難い。しかしながら、図-3に示すように加速度振幅レベルが土石流>常時微動となるので、これより土石流と常時微動の判別は可能となる。

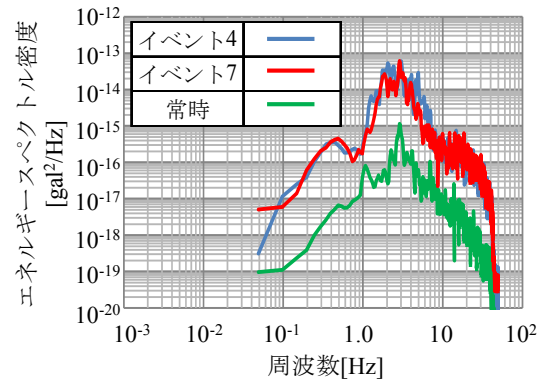
(3) 地盤振動スペクトルの比較と土石流由来の振動抽出

このエンベロープ比の違いを詳細に調べるために、土石流等発生時と常時微動における加速度データから得られた地盤振動スペクトルを図-5に示す。ここでは、伊豆大島における土砂移動に伴うイベント4と7(図-2)のうち、土石流等発生に由来する振動が生じてから20秒間のデータを対象とする。また、常時微動のデータとしては、2013/06/26 15~16時のうちの20秒間を対象とする。これより、GJKV 地点と OOHV 地点共に、土石流等発生時のスペクトルは常時微動の結果を大幅に上回る。また、イベント毎のスペクトル波形は概ね類似しているものの、地点間では一致しない。

土石流発生時における全イベント時の無次元スペクトル



(a) GJKV 地点



(b) OOHV 地点

図-5 常時・土石流等発生時の地盤振動スペクトルの比較 (伊豆大島)

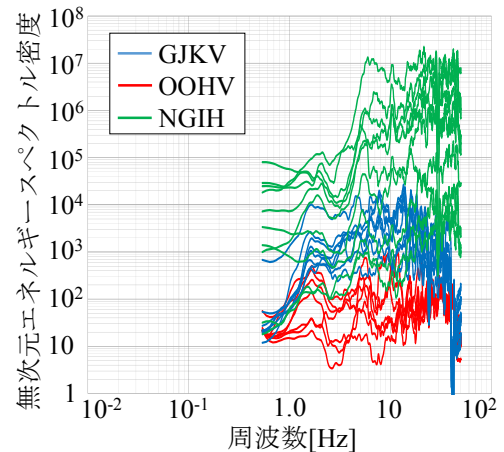


図-6 土石流発生時の無次元地盤振動スペクトルの比較

ルを図-6に示す。この無次元化は土石流発生時の結果を常時微動の結果で除したものを表示している。これを見ると、伊豆大島の2地点では低周波成分が卓越しているのに対して、南木曽では低周波成分よりも高周波成分が顕著になっていることが分かる。このようなスペクトル形状の違いに起因して、高周波数成分が卓越する南木曽ではエンベロープ比が大きい、低周波数成分が顕著な伊豆大島ではエンベロープ比が小さくなる。

上述したスペクトル特性の差異を調べるために、高・

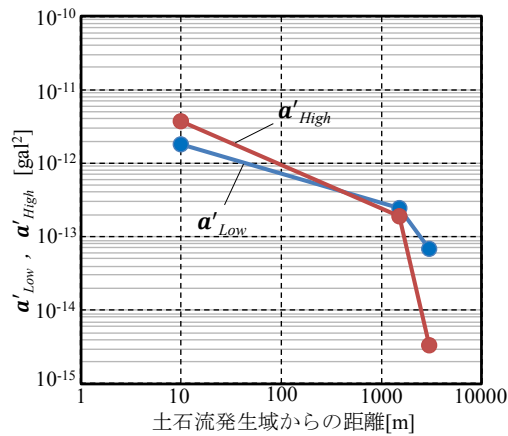


図-7 土石流発生域からの距離と加速度振幅（低周波 a'_{Low} 、高周波 a'_{High} ）の関係

低周波域における加速度変動成分のRMS値 a'_{High} 、 a'_{Low} と土石流発生域からの距離の相関図を図-7に示す。ここでの a'_{High} と a'_{Low} は、伊豆大島では全土石流イベントの中央値を、南木曽は土石流発生直後のデータを用いる。これより土石流発生域から遠くなるほど高周波成分 a'_{High} の減衰が卓越し、これが、両サイトのスペクトル波形やエンベロープ比の差異を生んだものと考えられる。なお、南木曽では巨礫を多く含む花崗岩、伊豆大島では火山性地質で石を多く含む等地質の差も考えられる。

4. 結論

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 南木曽では、土石流発生時のエンベロープ比 E は地震時より大きく、かつ、10以上となった一方で、伊豆大島のエンベロープ比は、土石流発生時の E は地震時よりも大きいものの10を下回った。これより、従来の研究で用いられている土石流の発生条件であるエンベロープ比 $E > 10$ という指標のみでは、土石流検知が困難なケースがあることが示された。
- 2) この要因を検証するために、地盤振動のスペクトル波形を検討したところ、伊豆大島では土砂移動発生時には相対的に低周波数帯の1~10Hzにスペクトル密度が大きい、南木曽では10Hz以上の高周波数帯においてスペクトル密度が大きくなった。このようなスペクトル波形の違いがエンベロープ比の差異に関係している。
- 3) 土石流発生域からの距離が長くなると、地盤振動の高周波成分の方が低周波成分よりも小さくなる可能性が示唆され、これが地盤振動のスペクトル波形の変化を生み出したものと推察される。

ここでは、伊豆大島や南木曽のみを解析対象としたが、今後は様々な土石流等由来の地盤振動データに関して検討を行い、上記の土石流検知手法の適用性の検証が必要である。

謝辞：本研究の一部は、（一財）日本建設総合センター研究助成によって実施された。本論文において解析に用いた地震計データは防災科学技術研究所よりご提供頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団：平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害調査報告書，pp.1-90，2014。
- 2) 土木学会，土木学会中国支部，地盤工学会：平成26年平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書，pp.1-296，2014。
- 3) 恩田裕一，辻村真貴，田中高志，笹木浩二，水山高久，内田太郎，田井中治，田中秀夫：降雨流出特性を用いた土石流警戒避難基準の策定法と検討，砂防学会誌，Vol.58，No.5，pp.13-17，2006。
- 4) 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。
- 5) 疋田誠，森山聡之，会田和義，石塚浩一：地盤振動を利用した土石流の検知警報，第2回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.13-16，2004。
- 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，pp.38-43，2006。
- 7) 大角恒雄，浅原祐，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考察，砂防学会誌，Vol.61，No.1，pp.3-10，2008。
- 8) 国土交通省砂防部，気象庁：土砂災害発生状況をセンサーによって把握する技術，土砂災害への警戒の呼びかけに関する検討会，第2回，資料4，2012。
- 9) Takahara, T., Kinoshita, A., Mizutani, T., Ishizuka, T., Ishida, T., Kaihara, S. and Asahara, H.: Analysis of ground-vibration induced by the sediment disaster on Izu Oshima, Tokyo in October 2013, *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Vol. 16, 5547p., 2014。
- 10) 二瓶泰雄，永野博之，大槻順朗，焼田航，梶純也：平成25年10月伊豆大島土砂災害における家屋被害状況，土木学会論文集B1（水工学），Vol.71，No.4，pp.I_1265-I_1266，2015。
- 11) 伊豆大島土砂災害対策検討委員会：伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書，pp.1-96，2014。
- 12) 国交省 HP：http://www.mlit.go.jp/river/sabofire/h26dosha/140805_nasizawa_dosekiryuu.pdf（閲覧日：平成28年4月3日）。
- 13) 防災科学技術研究所 HP：Hi-net 高感度地震観測網，<http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>（閲覧日：平成27年9月25日）。
- 14) 火山活動連続観測網 VIVA Ver.2：http://vivaweb2.bosai.go.jp/viva/v_index.html（閲覧日：H27年9月29日）。

(2016.4.4 受付)