

5-1 リアルタイム計測情報を活用した土砂災害危険度情報の作成技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流）

研究担当者：石塚忠範、山越隆雄、武澤永純

【要旨】

平成 20 年 3 月より全国で都道府県の砂防部局と気象台が連携し、豪雨による土砂災害に対する警戒避難体制の構築支援のために、「土砂災害警戒情報」の発表が行われているが、地形・地質等の違いによる影響が十分に加味されていない等の課題が指摘されており、土砂災害に対する警戒避難に資する危険度情報作成技術を確立することが急務である。平成 23 年度は、技術を運用する際に必要な斜面や溪流における土砂災害の前兆及び発生監視を行うにあたって、地震計ネットワークを使った面的な監視方法の適用可能性を検討した。

キーワード：大規模土砂移動、地震動、高感度地震網、せん断波速度

1. はじめに

1. 1 背景

平成 20 年 3 月より全国で都道府県の砂防部局と気象台が連携し、豪雨による土砂災害に対する警戒避難体制の構築支援のために、「土砂災害警戒情報」の発表が行われている。しかし、現行の土砂災害警戒情報は、①実績の乏しい地域・現象に対して精度が低い可能性が高い。②地形・地質等の違いによる影響が十分に加味されていない。③降雨のみを指標としているため、切迫性が伝わりにくい。④市町村単位の情報であるため、避難の対象地域が絞り込めない、などの課題が指摘されている。実際、土砂災害警戒情報の発表が進められてきているにも関わらず、土砂災害発生前に警戒情報が発表されていない事例も多く、土砂災害発生時に避難が完了していないことが多い。そのため、①～④の課題を解決する土砂災害に対する警戒避難に資するきめ細かい危険度情報作成技術の確立が急務である。

土砂災害に対する警戒避難体制をとるに当たって、土砂移動現象を検知するセンサー等を活用することが有効であることは従来から指摘されている¹⁾。住民が避難をしたきっかけを調査した事例の中には、近くで土砂災害が発生したことが比較的多い²⁾ことから、そのような事象を検知して警戒避難に資するためのセンサーが開発された³⁾。しかし、このようなセンサーを効率的に運用させるためには、市町村の大字単位程度の運用が望ましいことが指摘されており⁴⁾、その場合センサーを広域に多数設置しなければならない。斜面崩壊の発生をより合理

的に監視するためには、少数でかつ広域に監視できるセンサーを設置することが有効と考えられる。

1. 2 地震計による面的な監視手法の現状と課題

大角らは、(独)防災科学研究所の高感度地震観測網(Hi-net)の地震観測データを用いて、大規模な土砂移動現象の発生箇所と時間を特定する手法を開発している⁵⁻⁷⁾。この手法は、地震・火山の分野等で震源の発生位置を特定する技術を応用したものであり、複数地点で観測された振動を利用して、振動の走時から、各観測地点に到達した時間を最も良好に再現できる震源位置（緯度・経度）と発生時間を計算するものである。本技術は崩壊土砂量 2000m³程度⁶⁾の比較的規模が大きい事象を検知した実績があること、土砂移動現象の振動は 30km 程度離れた地震計でも観測されていることから、地震計を用いて広い領域が監視できること、ほぼリアルタイムで運用することが可能であること等土砂災害を早期に監視する技術のひとつとして非常に有効であると考えられる。

一方、当該技術による崩壊発生箇所の特定精度は、土

表 1 対象事例

年月日	時間	発生地域	Hi-net観測地点				
2004/8/1	20:00-21:00	徳島県那珂町 ⁵⁾	木屋平	貞光	海南	徳島	
2004/8/10	00:00-01:00	奈良県大塔村 ⁵⁾	花園	十津川西	十津川東	川上	
2005/9/6	21:00-22:00	宮崎県西郷村 ⁷⁾	諸塚	南郷	東郷	矢部	
2011/9/4	16:00-17:00	奈良県五條市 ⁵⁾	花園	川上	黒滝	東吉野	尾鷲

砂移動現象が発する地盤振動が観測地点へ到達した時間の評価方法に影響を受けることが指摘されており、個別事例ごとに検証されている^{6) 7)}が、振動の減衰やその他ノイズの影響でエンベロープ最大時刻振幅の決定は容易ではないことも報告されている⁵⁾。

また、当該技術を運用する上で、計算結果はその地域のせん断波速度と調和的であることが報告されている⁵⁾が、その詳細は明らかになっていない。地震計が3点の場合、最適な地盤のせん断波速度を設定するため、地盤のせん断波速度が解析精度に与える影響をあらかじめ把握する必要がある。

1. 3 本研究の目的

本研究は、観測地点へ到達した時間の特定処理方法について、より精度のよい手法を提案するとともに、崩壊位置を同定した時のせん断波速度と観測地点のせん断波速度の関係を評価するものである。

2. 研究方法

2. 1 データセット

対象とする事例と解析に用いた観測点を表 1 に示す。本研究では、①土砂移動現象の発生箇所と概ねの発生時間が判明していること②(独)防災科学技術研究所の4箇所以上の高感度地震観測網(Hi-net)の観測地点において、地震以外の振動が観測されていること、の2つの条件を満たす4事例を選定した。

表1の事例について、発生源位置推定計算⁶⁾を行った。震源の深さは0kmとし、各観測地点の重みはすべて1とした。せん断波速度は0.1~3.0km/secの範囲で0.1km/sec刻みで計算し、せん断波速度ごとの推定震源位置と走時残差の平方和を算出した。残差平方和が最小を示したせん断波速度は、観測地点のせん断波速度と物理探査結果¹⁰⁾から平均的なせん断波速度として算出した結果と比較した。平均的なせん断波速度は式(1)で算出した。

$$AVs = \sum_{i=1}^n H_i / \sum_{i=1}^n H_i / Vs_i$$

ここで、 AVs : 観測地点の平均的なせん断波速度、 H : i 層の層厚、 Vs : i 層のせん断波速度である。

土砂移動現象の振動の到達時刻は、各観測地点の垂直成分の処理を行った波形において最大値を示した時刻と特定した。特定処理方法は、A) RMS エンベロープ¹¹⁾、B) 1-10Hz のバンドパスフィルタを施した波形記録の絶対値(1-10Hz Band)、C) 観測波形が卓越する振動

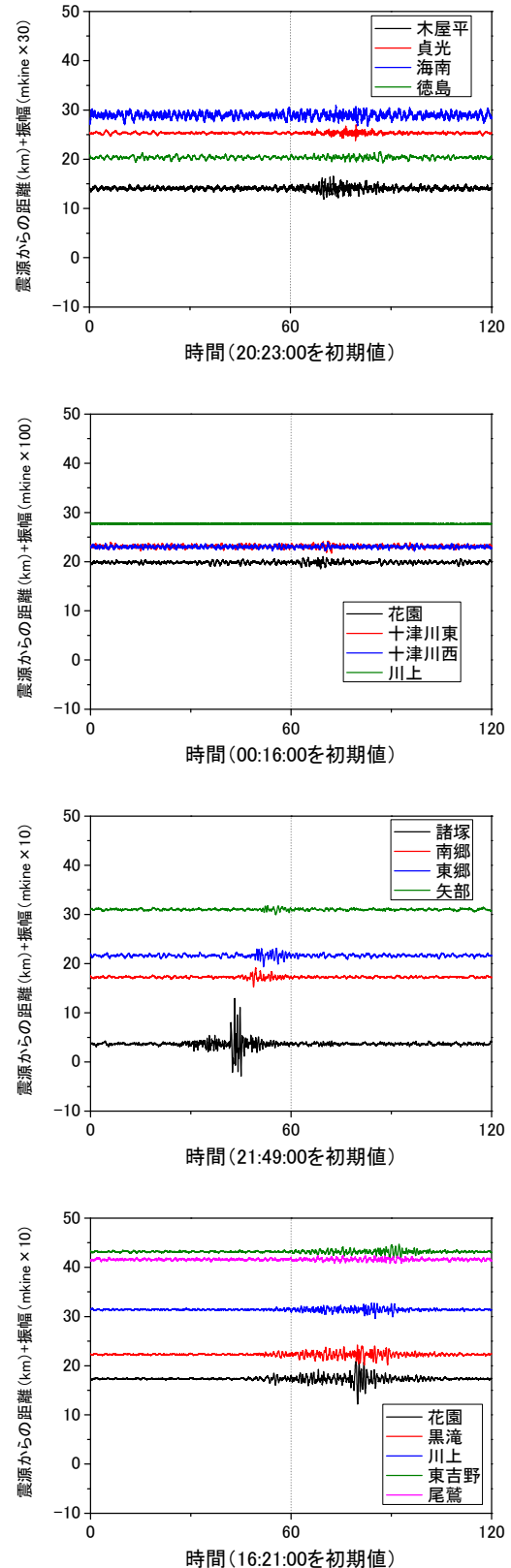


図1 Hi-net 観測地点のレコードセクション(上から徳島県那賀町、奈良県大塔村、宮崎県西郷村、奈良県五條市の事例)

数帯域を抽出し、その帯域でバンドパスフィルタを施した波形記録の絶対値(Any Band)、の3パターンとした。

2.2 振動波形到達時間の特定

図1に各事例における発生地点周辺のH-net観測地点の加速度波形(垂直成分のみ)を示す。これより、徳島県那賀町は20:24すぎ、奈良県大塔村は00:17前後、宮崎県西郷村は21:50前、奈良県五條市は16:22過ぎに振動が観測されている。振幅は縦軸に示されているとおり、任意の倍率を乗じているが、宮崎県西郷村は諸塚で、奈良県五條市は花園でホワイトノイズよりも大きい明瞭な振動が確認できる。事例ごとに観測地点における震源からの距離の最大値と最小値の差を見ると、徳島県那賀町は14.8km、奈良県大塔村は7.8km、宮崎県西郷村は27.3km、奈良県五條市は25.9kmであった。

この波形を用いて、振動波形の到達時間を特定した結果を表2に示す。この結果を用いて、発生源位置推定計算を行った。

表2 到達時間推定方法毎の振動波形到達時間の特定結果

事例	観測地点	エンベロープ	1-10Hz band	AnyBand
徳島県那賀町	木屋平	20時24分12.85	24分11.57	24分09.84
	貞光	24分19.6	24分19.55	24分19.55
	海南	24分19.97	24分17.38	24分26.79
	徳島	24分26.93	24分19.51	24分19.96
奈良県大塔村	花園	0時17分08.90	17分08.36	17分08.84
	十津川西	17分12.13	17分09.22	17分12.02
	十津川東	17分11.07	17分16.70	17分11.10
	川上	17分13.38	17分13.33	17分13.35
宮崎県西郷村	諸塚	21時49分43.14	49分43.91	49分43.09
	南郷	49分48.81	49分48.49	49分48.78
	東郷	49分51.82	49分50.09	49分51.28
	矢部	49分55.45	49分53.4	49分55.44
奈良県五條市	花園	16時22分19.97	22分20.66	22分19.89
	川上	22分25.20	22分24.87	22分25.19
	黒滝	22分28.91	22分20.13	22分20.75
	東吉野	22分29.55	22分28.44	22分29.52
	尾鷲	22分22.30	22分28.03	22分30.56

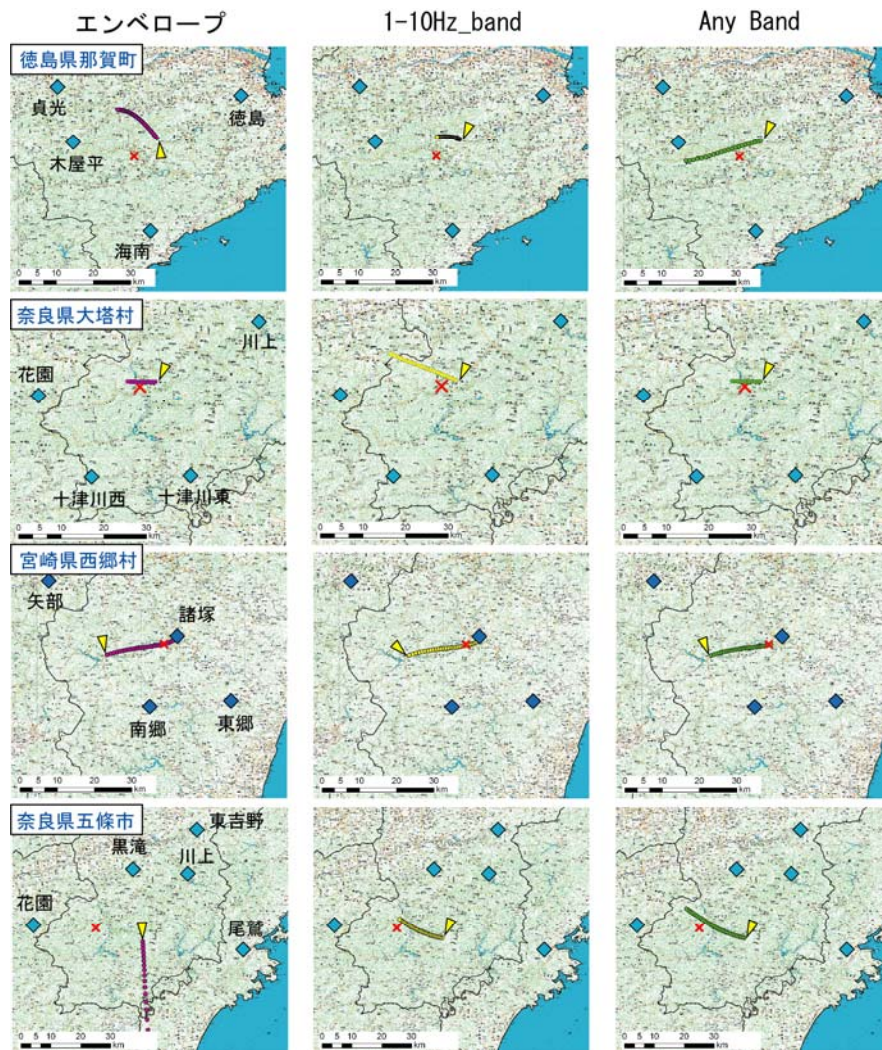


図2 発生源位置推定計算

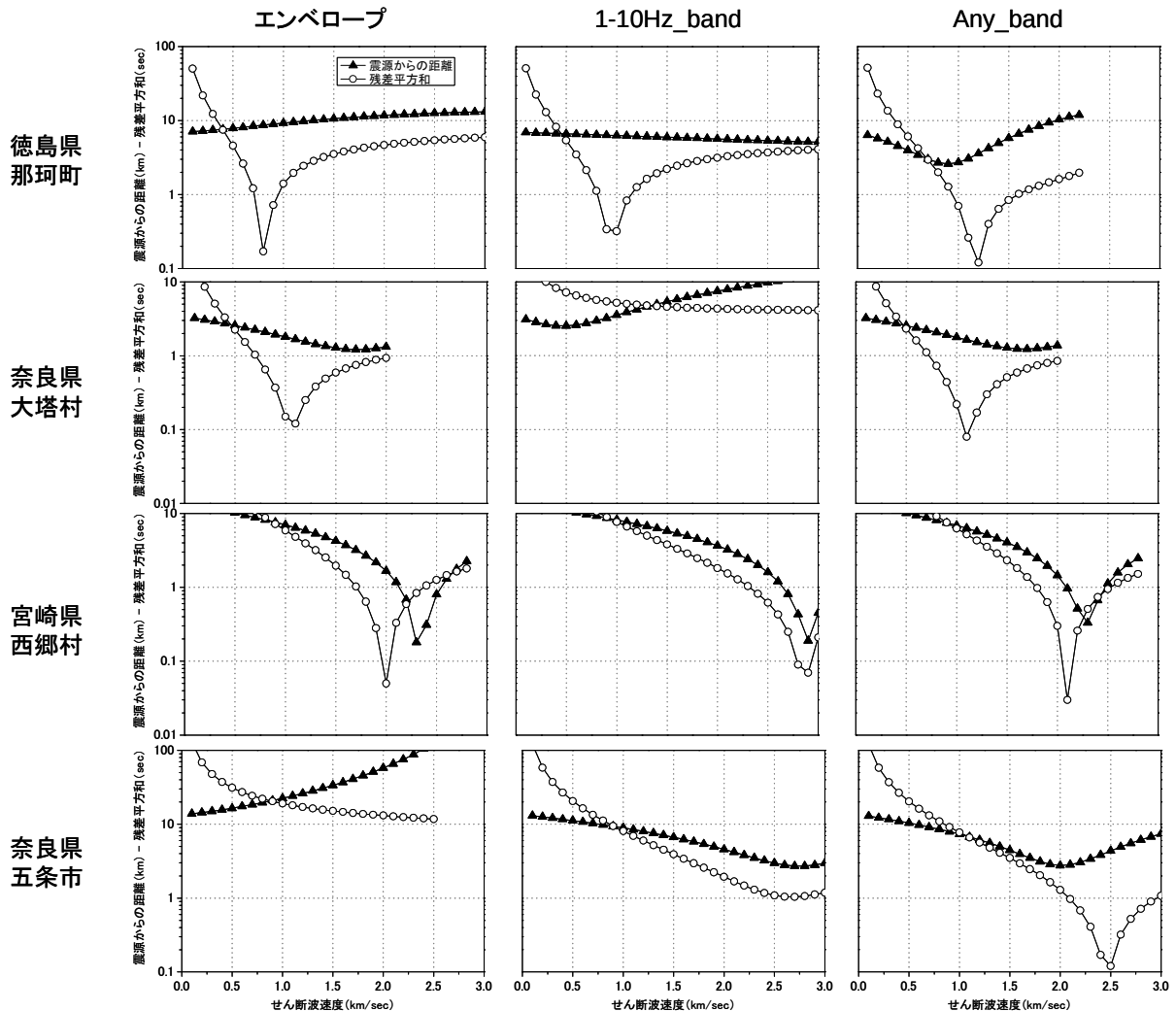


図3 発生源位置推定計算（左：エンベロップ、中：1-10Hz Band、右：Any Band）

3. 結果と考察

3.1 波形到達時間特定方法が特定精度に与える影響

図2に発生源位置推定計算を行った。図は上から徳島県那賀町、奈良県大塔村、宮崎県西郷村、奈良県五條市の結果を示しており、図の左から振動波形特定処理方法をエンベロップ、1-10Hz_Band、Any Bandの結果である。図の赤い×印は土砂移動現象発生箇所、菱形はHi-net 観測地点、○印はせん断波速度ごとの計算結果、黄色い△印はせん断波速度が0.1km/secの時の計算結果を示している。図より、せん断波速度ごとに特定された震源位置は1本の線上に分布することがわかる。また、せん断波速度が速くなるほど土砂移動現象発生箇所に接近するケースと、土砂移動現象発生箇所から遠ざかっていくケースがある。

図3は、せん断波速度に対する残差平方和と震源（崩壊発生箇所）からの距離を示す。計算結果は0.1～3.0

km/sec まで 0.1 刻みで計算を実施しており、データが 3.0km/sec 以内にプロットされていないものについては、計算が収束しなかったことを示す。図3より、各事例において、残差平方和が極小値を示したときの位置が、本手法によって特定された位置であり、残差平方和が極小値を示したときの震源からの距離が、本手法によって特定された位置と実際の崩壊位置の距離（本手法で生じる誤差）になる。残差平方和は任意のせん断波速度で極小値を示す場合と極小値を示さない場合（残差平方和については、奈良県大塔村：1-10Hz_band、奈良県五條市：エンベロップ）があり、残差平方和とせん断波速度は極小値を示すせん断波速度は全て一致しなかった。

この影響を分析するために、奈良県大塔村、奈良県五條市において、振動波形が観測地点に到達した時間を特定処理方法ごとに走時表上に示したものを図4に示す。図の破線が観測地点を示し、その線状にあるマーカーが

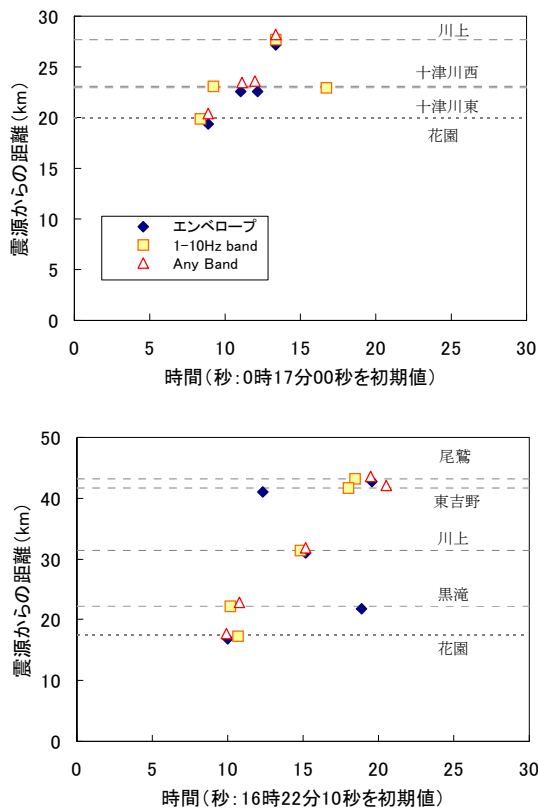


図4 Hi-net 観測地点の走時表と、処理ごとの振動波形特定時間（上から奈良県大塔村、奈良県五條市）

各処理方法ごとに特定した振動波形が到達した時間（走時）を示している。各マーカーにおいて、震源からの距離と時間（走時）が直線的な相関関係を示せば、解析結果が良好となるが、奈良県大塔村の 1-10Hz_Band、奈良県五條市のエンベロープにおいては、プロットに大きなばらつきがあることが読み取れる。具体には、奈良県大塔村の 1-10Hz_Band では十津川東、奈良県五條市のエンベロープでは、黒滝、東吉野の観測地点の読み取り値が大きくなばつきを生じている。本研究で採用した振動波形の各到達特定方法は、どの方法も振動波形にフィルタリングを行い、振動波形の特徴をより明瞭にする方法であるが、振動観測地点、もしくは振動波形によっては、本来抽出したい特徴的な波形を見出せず、逆に検知精度を悪化させる場合もあると考えられる。崩壊発生箇所特定における振動波形の特定処理方法は、観測地点の走時が直線的な関係になるように到達時間を評価できる方法が望ましいと考えられる。なお、残差平方和とせん断波速度は極小値を示すせん断波速度と全て一致しなかった。

図5に、各特定処理方法において推定した震源位置と実際の崩壊位置との距離を示した。五條市におけるエン

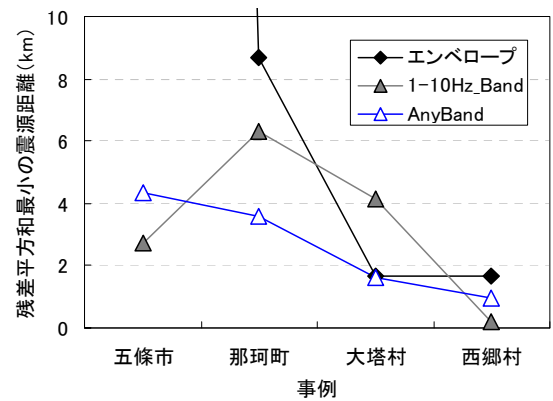


図5 波形到達時間特定方法が解析精度に与える影響

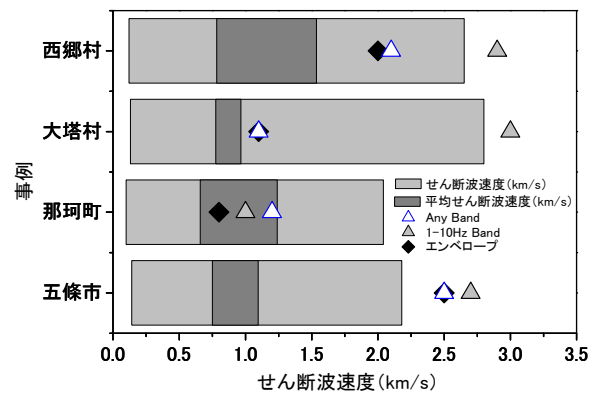


図6 観測地点のせん断波速度の範囲と同定せん断波速度の関係

ベロープの結果は、震源距離が 132km と算出されたため、欄外となっている。また、最も震源距離を良好に示しているのは西郷村の 1-10Hz_Band で、0.2km であったが、特定方法の精度の優劣は事例ごとに異なることがわかる。この震源距離の最大・最小値の範囲を見ると、エンベロープは 1.7-132km、1-10Hz_Band は 0.2-6.3km、Any Band は 1.0-4.4km であり、最大・最小値の差が最も小さいのは Any Band であった。

3.2 観測地点のせん断波速度の範囲と同定せん断波速度の関係

図6は各事例で観測した Hi-net 観測地点のせん断波速度・平均せん断波速度（式（1）により算出）の範囲（横バーで図示）と、各到達時間特定方法において残差平方和が最小を示したときのせん断波速度（同定せん断波速度、マーカーで図示）を示す。これより、那賀町以外は、同定したせん断波速度と Hi-net 観測地点の平均せん断波速度の範囲は一致せず、Hi-net 観測地点のせん断波速度の範囲とは一致した事例は見られるものの、その傾向は

見出せなかった。

ここで、2.2 で整理した観測地点における震源からの距離の最大値と最小値の差と、解析で同定したせん断波速度と比較すると、震源からの距離の差が相対的に小さい那賀町と大塔村は、同定したせん断波速度は遅く、震源からの距離の差が相対的に大きい西郷村と五條市は同定したせん断波速度が速い傾向にあることがわかる。土砂移動現象の発生箇所（震源）と観測点が近い場合、振動の伝達経路は地表付近を通ると考えられるが、発生箇所と観測地点が遠くなればなるほど振動の伝播経路はより地中深くになると考えられる。つまり、震源からの距離の最大値と最小値の差が大きい場合、各観測地点に伝わる振動は地表近くを伝わる波と地中深く伝わる波が混在する可能性が考えられ、震源からの距離の最大値と最小値の差が小さい場合、各観測地点に伝わる振動は地表近くを伝わる波と地中深く伝わる波のどちらかが卓越することが考えられる。それが解析結果に影響した可能性が考えられる。この点を解明するには、同一の地域で、発生位置が異なる複数の事例を分析する必要があるが、現状ではこのような事例は確認されていないため、今後も引き続きデータの蓄積・分析を図っていく予定である。

4. まとめ

本研究で得られた結論は以下の通りである。

1) 地震計で観測された大規模土砂移動現象事例を対象に振動波形到達時間の特定処理方法を変えて震源特定を実施した結果、特定処理方法の違いによって、震源特定の精度に影響を与えることがわかった。また、Any Bandは他と比べて震源特定位置の最大・最小値の差がもっとも小さいことがわかった。

2) 観測地点のせん断波速度の範囲と解析により同定したせん断波速度を比較したが、両者の関係は見出せなかった。

最後に、本研究の実施に当たっては、徳島大学工学部の大角恒雄氏、先端力学シミュレーション研究所の浅原裕氏には貴重なご意見を頂きました。また、本研究には（独）防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）

の観測地点の波形データ・ボーリング柱状図を利用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、山田 孝、南 哲行、水野 秀明：土石流災害防止のためのセンサー開発の現状と今後の課題、砂防学会誌、Vol.50、No.5、p.60-64、1998.
- 2) 小山内信智、小島伸一：土砂災害警戒情報の運用と活用状況、砂防と治水、180号、22-26、2007.
- 3) 独立行政法人土木研究所、有限会社秋山調査設計、坂田電機株式会社、株式会社拓和、中央開発株式会社、日本工営株式会社：土砂災害の警戒避難支援のための斜面崩壊検知センサの開発共同研究報告書、独立行政法人土木研究所共同研究報告書第419号、2011.
- 4) 佐藤一幸、中村圭吾、阿部聡、内田太郎、小段應司、菊井稔宏、宮瀬将之：警戒避難対策に活用するための斜面崩壊検知センサーの設置方法に関する一考察、平成22年砂防学会研究発表会概要集、146-147、2010.
- 5) 大角恒雄、浅原裕、下川悦郎：2004年8月10日奈良県大塔村斜面土砂移動時のHi-netデータ解析—斜面土砂移動検知への応用—、自然災害科学、Vol.24、No.3、267-277、2005.
- 6) 大角恒雄、浅原裕、下川悦郎：2005年長野県白馬岳落石・土砂移動の高感度地震観測網波形を用いた震源推定、日本地すべり学会誌、Vol.43、No.1、27-32、2006.
- 7) 大角恒雄、浅原裕、下川悦郎：河道閉塞近傍の振動センサー記録による振動特性の検討、第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集、163-168、2006.
- 8) 末峯 章、海堀 正博、王 功輝、古谷 元：平成16年台風10号による徳島県那賀川上流域で発生した土砂災害の緊急調査報告、地すべり学会誌、Vol.41、No.3、87-89、2004.
- 9) （独）防災科学技術研究所 HP：
http://www.bosai.go.jp/press/2011/pdf/20110912_02.pdf
- 10) KiK-net 基盤強震観測網土質図
<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>.
- 11) 小原一成：S波エンベロープ拡大現象、地震、第2輯、第54巻、159-170、2001.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SEDIMENT-RELATED DISASTER WARNING USING REAL-TIME MONITERING DATA

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Volcano and Debris Flow Research
Team

Author : ISHIDUKA Tadanori

YAMAKOSHI Takao

TAKEZAWA Nagazumi

Abstract : In this study, We examined the estimating the site of large sediment-related phenomenon using data of Hi-net (High Sensitivity Seismograph Network, Japan). We organized 4 large sediment-related phenomena which confirmed seismic waves by themselves. At result, we confirmed that the estimated source point of seismic wave depend on method of estimating arrival time of seismic wave each observation site. Also, shear wave which investigated by geophysical exploration and shear wave which fitted from analysis result has no relation.

Key words : Large sediment-related phenomenon, seismic wave, High Sensitivity Seismograph Network, shear wave