

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

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF SEISMIC WAVES ASSOCIATED WITH
LANDSLIDE DAMS AND ESTIMATION OF COLLAPSED POINT USING THE DATA OF
HIGH SENSITIVITY SEISMOGRAPH NETWORK

大角 恒雄¹・浅原 裕²・下川 悦郎³

Tsuneo OHSUMI, Hiroshi ASAHARA and Etsuro SHIMOKAWA

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

²株式会社 先端力学シミュレーション研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1 理化学研究所 研究交流棟 W110)

³鹿児島大学農学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目 21 番 24 号)

Key words : Hi-net, landslide dams, dam collapse, slope failure, envelope

1. はじめに

2005年9月6日に九州地域を襲った台風14号は、多くの斜面災害を引き起こした。宮崎県西郷村塚原ダム下流では同日 21:30 以降に大規模斜面崩壊が発生し、耳川の河道閉塞(湛水約 3,500,000 m³)を発生させた。崩壊地脚部から 3.8 km の地点に防災科学技術研究所 Hi-net のサイト諸塚が存在する。諸塚地点の Hi-net 観測記録はノイズも少なく、6日 21 時と 7日 0 時に振動のピークを捕らえている。これらの波形から、振動特性の検討を実施する。さらにその周辺の観測点波形から崩壊位置の推定を行い、発生源の確認も行った。

2. 観測記録

斜面崩壊と振動波形の解析を実施した事例は幾つかみられる。たとえば、Kanamori ら^{1),2)} はセントヘレンズ火山等の地震波の解析を実施し、地すべりの摩擦係数の算定を試みている。Kawakatsu³⁾ は地震が断層から生じるダブルカップルの現象であるのに対し、地すべりをシングルカップルの現象として、ペルーで起きた巨大な地すべりによる振動を解析した。この中で、地すべり現場から数千 km 離れた遠方のデータを用いて地すべりの規模の推定に適用する指標を提案している。ただし、Kawakatsu の場合は、6-8 mHz 透過のフィルターで処理した長周期波形を用いている。水野ら⁴⁾ は岡山県総社市における斜面崩壊にともなう振動をとらえた Hi-net データを解析することで、崩壊位置から 200 km 離れた場所までのレコードセクションから、見かけ速度 3.5 km/sec の S 波と部分的に見かけ速度 6 km/sec の P 波が伝搬していることを見だし、win システム⁵⁾を用いて到着時間を検出し、Hirata and Matsu'ura⁶⁾ の震源

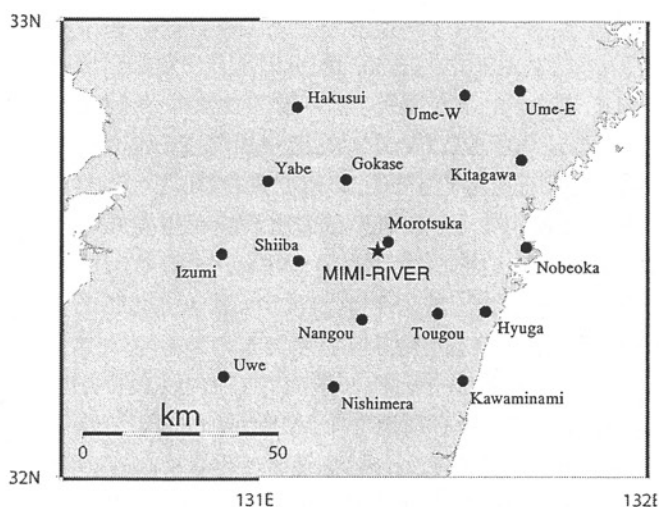


図1 塚原ダム下流斜面崩壊位置と Hi-net 観測点位置

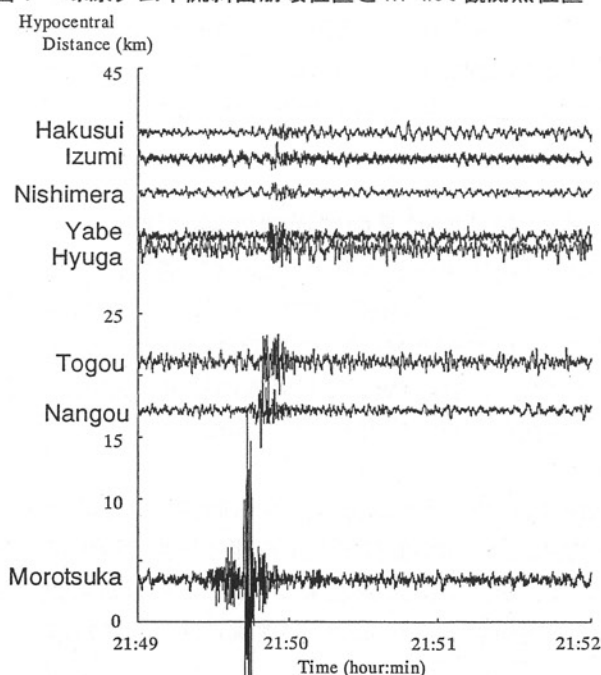


図2 Hi-net 観測波形のレコードセクション

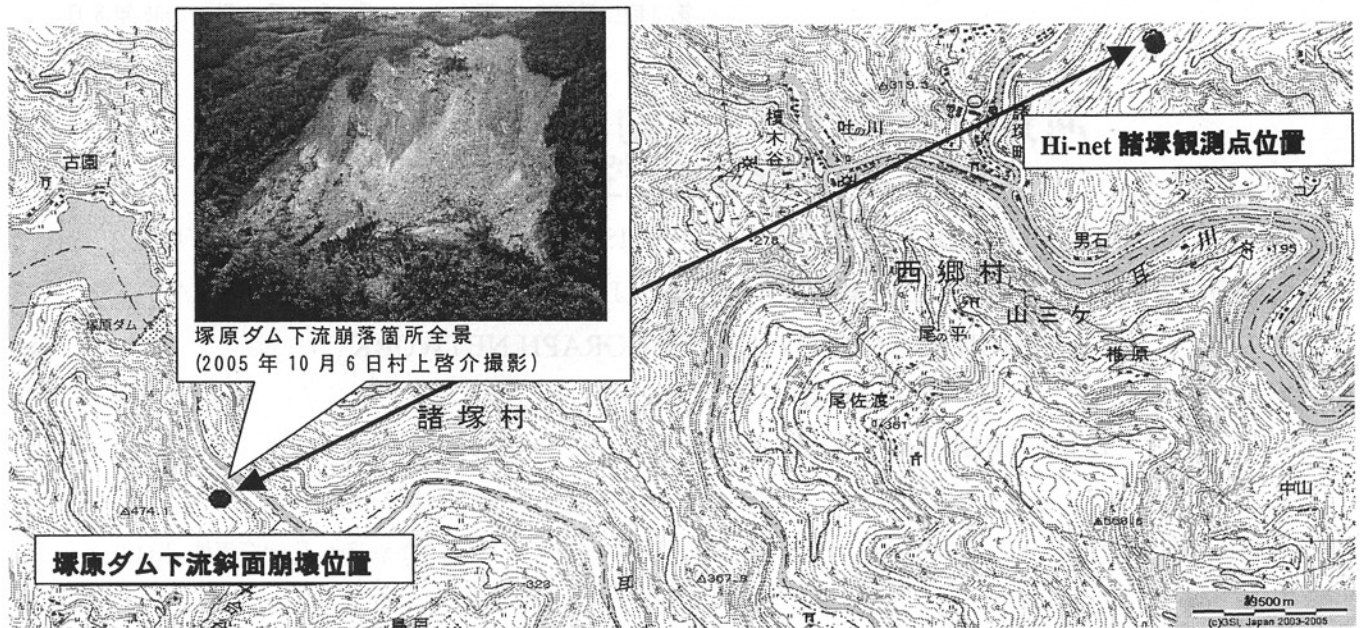


図3 塚原ダム下流斜面崩壊位置と Hi-net 観測点位置 国土地理院の数値地図 250m メッシュ

決定アルゴリズムを用い、5 km 程度の誤差で震央を求めている。また、S 波が優勢で、卓越振動数は 0.5-2.0 Hz であることも示されている。さらに現場踏査を含め振動と崩壊の関係を解明することの重要性を示している。

本検討で使用する宮崎県南部の土砂崩壊現場周辺の Hi-net 観測点の記録は、激しい降雨時のものであり、ノイズが多く不明瞭である。観測点位置(図 1)ならびに 6 日 21 時に観測された時刻歴速度波形のレコードセクション(UD 成分: 図 2)を示す。8 観測点で 21:49:43 から 21:50:07 にかけて土砂崩壊に伴う振動が検知されている。最も近傍である諸塚サイトは崩壊地点から 3.8 km の地点に存在し(図 3)、耳川の崩壊位置から 40 km 以内では明瞭な波形が記録されている。40 km 以上離れるとノイズが入って不明瞭であるが、白水サイトでもわずかながら振動は観測されている。なお、気象庁一元化リストによれば当該時刻において地震は検知されていないことを確認した。

3. 台風 14 号の宮崎県内斜面崩壊被害状況

台風 14 号は極めてゆっくりとした速度で進行し、9 月 4 日から 6 日までの 72 時間で 500 mm 以上の累加雨量となり、土砂移動が多発した。宮崎県では南部の鰐塚山周辺と北部の諸塚村周辺に斜面崩壊被害が集中し、大規模崩壊と人命に被害を与えた崩壊を発生させた(図 4)⁷⁾。

宮崎県内の被害状況は、9 月 29 日時点の県砂防課調べによると、崖崩れは 61 件、土石流 46 件、地すべり 17 件の被害が発生した。県北部の被害は、宮崎県東臼杵農林振興局管内の同時点の山地関連調査によれば、

高千穂町 20 件、南郷村 61 件、椎葉村 53 件、諸塚村 22 件、西郷村 13 件であった。北部の諸塚村周辺を流れる耳川では、塚原ダム下流右岸側の斜面が、斜面方向 300 m の規模で崩壊し、耳川をせき止め、後述の河道閉塞が生じた。

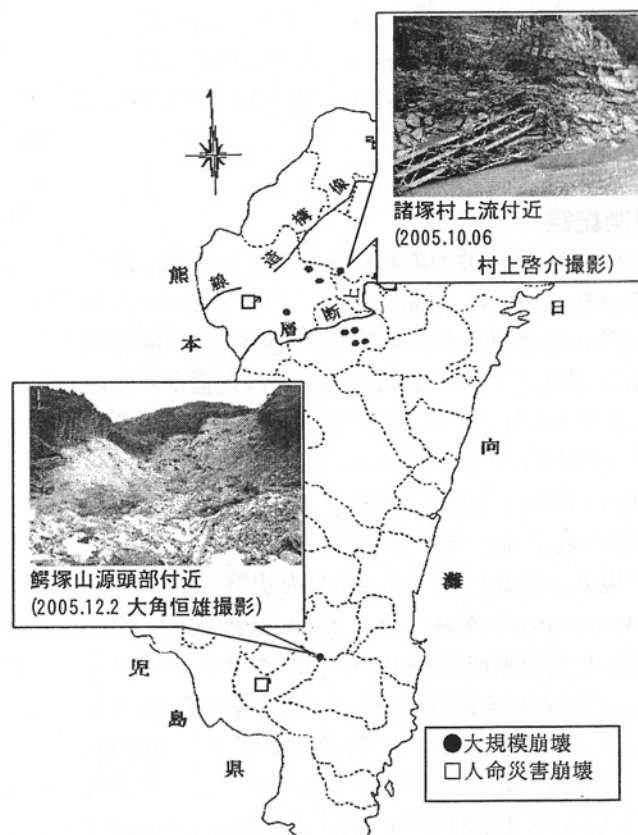
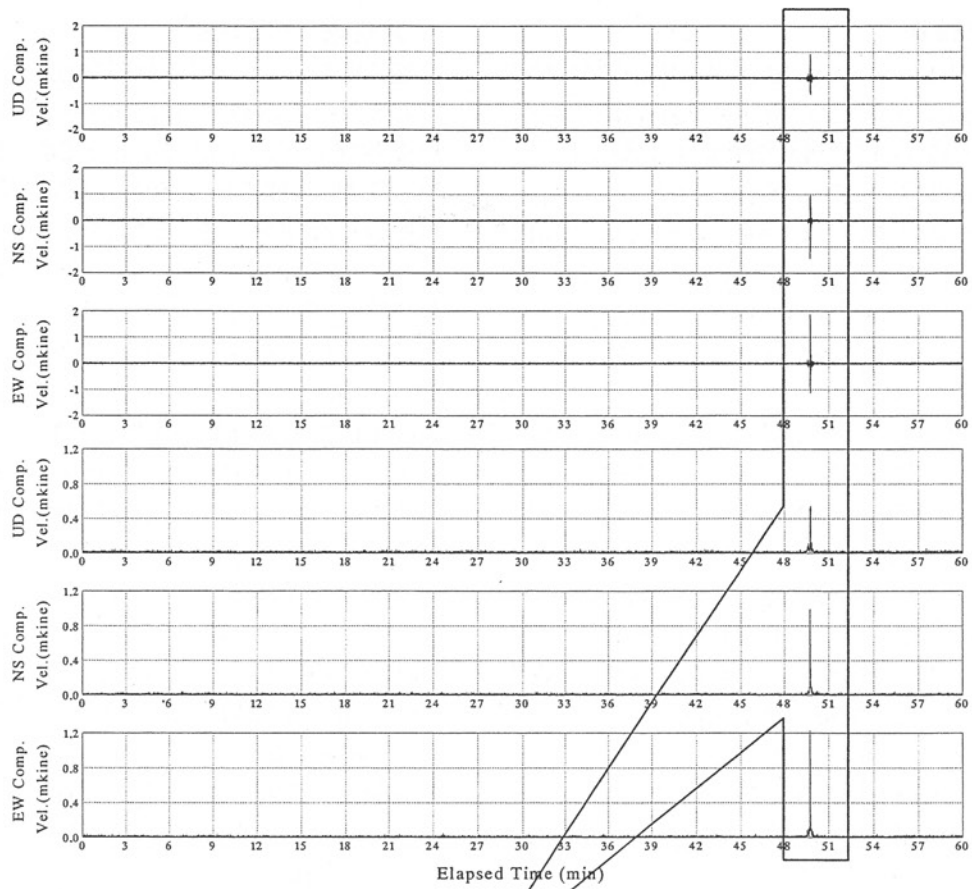
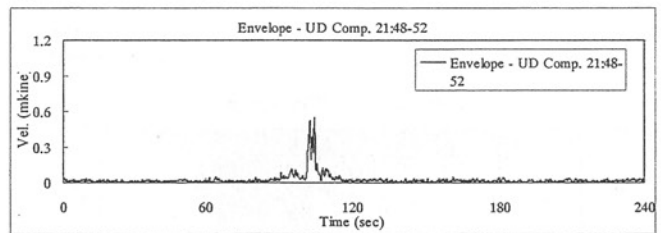
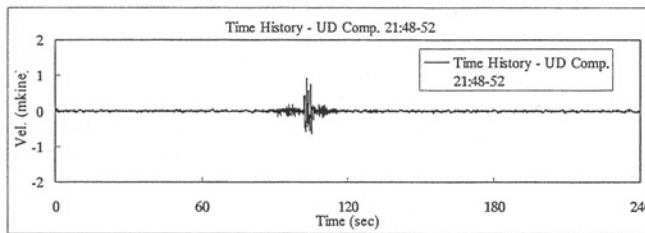


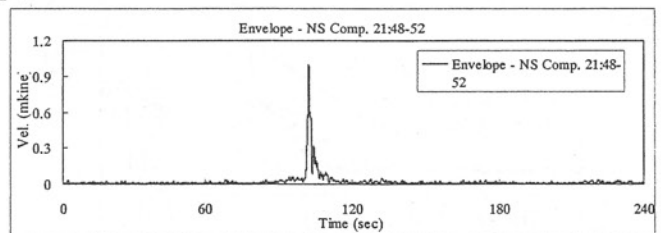
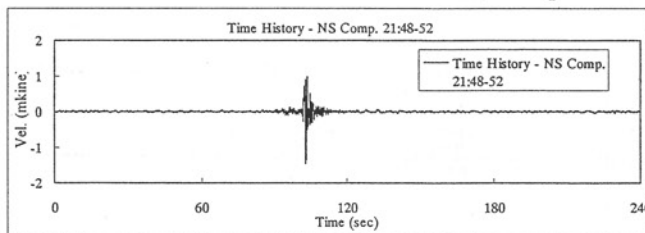
図4 台風 14 号による大規模崩壊と人命に被害を与えた崩壊 谷口ら⁷⁾に一部加筆



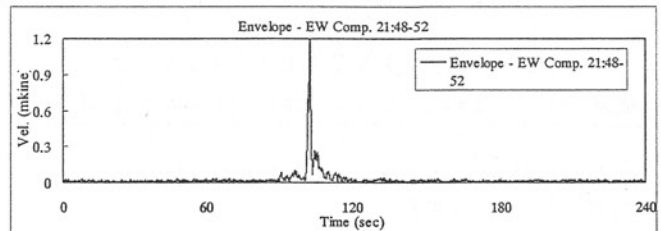
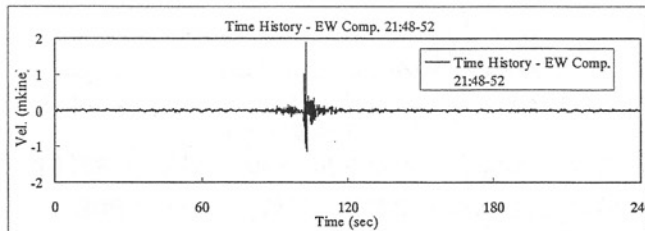
Hi-net Morotsuka Continuous Time History and Envelope (6 Sep., 2005 21:00~22:00)



UD Comp. 6 Sep., 2005 21:48~21:52



NS Comp. 6 Sep., 2005 21:48~21:52



EW Comp. 6 Sep., 2005 21:48~21:52

図5 Hi-net 諸塚地点の連続記録とエンベロープ解析結果 (2005年9月6日 21:00~22:00)

4. 河道閉塞時刻

2005年9月6日 21:00~22:00のHi-net 諸塚地点の連続記録とエンベロープ解析結果を図5の中段・下段に示す。21:49:43に顕著な振動が上下動(UD), 水平動(NS,EW)のすべての成分でみられる。

藤澤ら⁸⁾の報告によれば, 塚原ダム放流量と山須原ダム流入量の差が示されている(図6)。崩壊土砂は一旦耳川をせき止め, 河道閉塞を形成し塚原ダム下流側では9月6日22:25に水位が62m堰上げされたことが九州電力によって確認されている。ついで22:56には塚原ダム下流側水位が5m低下し, この直前に河道閉塞の越流浸食が生じたことが想定される。この経緯は九州電力塚原ダムで観測された放流量とこの下流側山須原ダムの流入量の変動状況に明瞭に現れている。21:49:43の振動はこの河道閉塞を生じた崩壊と思われる。このことは, 堰上げが生じる25分前に河道閉塞が生じたこととなる。なお, 塚原ダム下流の山須原ダムの流入の上昇等から, この河道閉塞が決壊したのは, 22:55頃から始まり, 7日1:00頃までと想定されるが, この時刻に対応する振動波形は得られていない。この原因としては, 河道閉塞決壊の進行がなだらかであったことが考えられる。

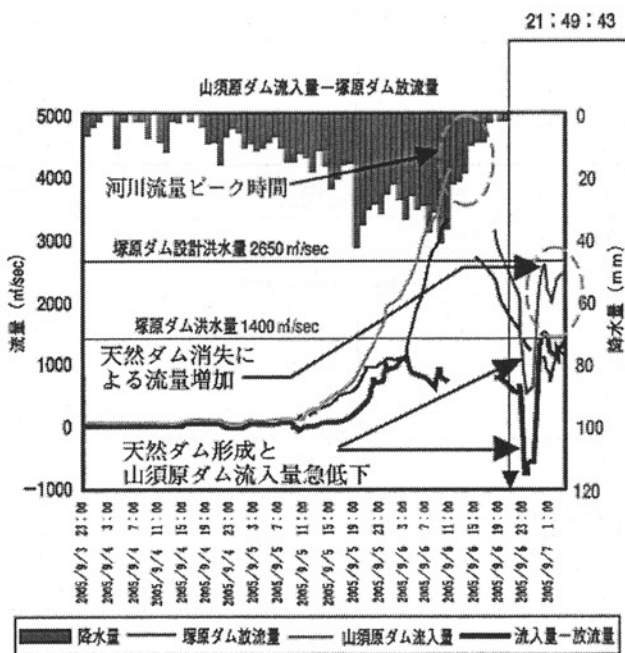


図6 塚原ダム放流量と山須原ダム流入量の差
藤澤ら⁸⁾に一部加筆

5. 非定常スペクトル

図7に21:49:30から1分間のUD成分における非定常スペクトルを求めた。非定常スペクトルとは, 時間毎の振動数成分がどのように変化してゆくかを縦軸に振動数, 横軸に時間をとって示したものである。観測波形の振動数の時間変化を見るために, 神山⁹⁾の非定常スペクトル手法を用いた。これはシステム関数を有する並列な帯域フィルタ(march filter)を用い, ある特定の周波数帯域だけをとりだし, その振幅包絡線を求めるというものである。図7の上段にUD成分の非定常スペクトル, 中段にUD成分の時刻歴波形を示す。下段はエンベロープ解析(包絡)である。表1に示すHi-net4観測点におけるエンベロープ最大振幅記録時刻を採用して崩壊位置を推定した。

図7から振幅が大きくなる時間帯(21:49:40以降)において1.1 Hz付近の成分が卓越していることがわかる。前述の岡山県総社市における斜面崩壊(卓越振動数: 0.5-2.0 Hz)⁴⁾, 2004年8月10日の奈良大塔村斜面崩壊(卓越振動数: 2 Hz)¹⁰⁾, 2005年8月11日の長野県北安曇郡白馬村北城白馬大雪溪葱平付近における落石・崩落の事例(卓越振動数: 2 Hz)¹¹⁾と同様に崩壊で観測された振動は低い振動数であり, 本事例の結果と調和する。

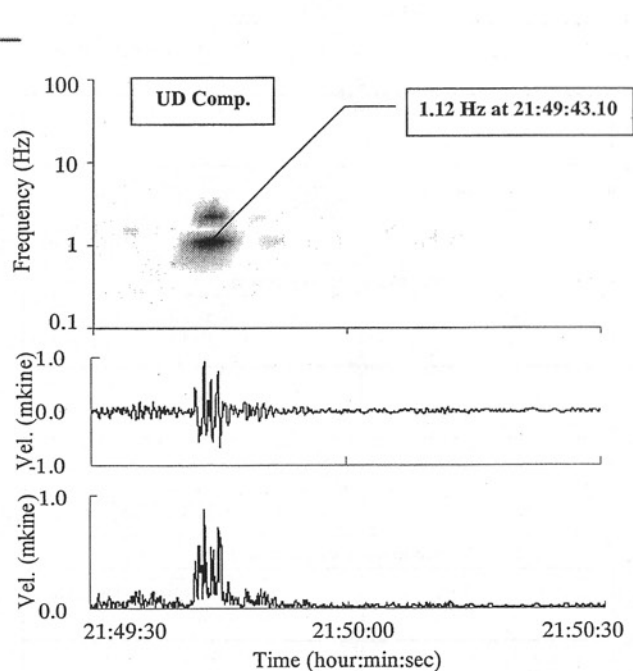


図7 非定常スペクトル(上段), 時刻歴波形(中段), エンベロープ解析(下段): Hi-net 諸塚

6. 崩壊位置算定結果

弾性波速度 v を 1.5 km/sec から 2.6 km/sec まで変化させて震源深さ 0 km の条件で崩壊位置決定を行った。弾性波速度を 0.1 km/sec ずつ増加させて震源決定を行い、弾性波速度の差異が決定される震源位置にどの程度反映されるのか検討した。震源決定では全観測点の走時残差自乗和を最小にするモデルから、未知数 3 (緯度・経度・発生時刻) の連立方程式の解を求める。本検討では震源決定に使用するデータが 8,5,4,3 カ所の場合を行った。震源決定観測点の S/N 比による選定と重み係数の設定を表 1 に示す。エンベロープ最大値とエンベロープ平均値の比を S/N 比と定義し、その逆数をそれぞれの観測点の重みとした。なお、重み係数には規格化のため、それぞれに定数を掛けている。震源決定に用いる観測点の数毎に弾性波速度を変化させて観測値を最もよく説明できる弾性波速度・震源位置を決定した (表 2)。その結果、4 点で弾性波速度 $v = 2.0$ km/sec として計算した場合の残差和の極小値が 0.04 で

表 1 震源決定観測点の S/N 比による選定と重み係数の設定

観測点	到達時間	S/N	8 点重み係数	5 点重み係数	4 点重み係数	3 点
諸 塚	43.10	17.62	2.263	1.785	1.603	○
東 郷	51.78	7.97	1.024	0.807	0.725	○
西米良	53.36	4.09	0.526	-	-	
南 郷	48.77	11.17	1.434	1.131	1.016	○
泉	54.93	5.40	0.694	0.547	-	
矢 部	55.41	7.20	0.925	0.730	0.655	
白 水	67.08	3.98	0.511	-	-	
日 向	57.54	4.85	0.622	-	-	

あり、最も小さい値となった。また、1カ所あたりの残差平均でも他の 8 点、5 点の場合に比べて小さい値となっている。ここで求められた弾性波速度 $v = 2.0$ km/sec はこの地域の防災科学技術研究所振動計設置位置の S 波速度 $V_s^{12)}$ の平均的なものと調和的である。北緯 32.4959・東経 131.2854、震源時刻 21 時 49 分 40.49 秒が最適値であり、崩壊地脚部と推定崩壊位置の距離の誤差は 1.4 km であった。

表 2 弾性波速度を仮定した場合の震源位置および震源時刻変化と残差二乗和の平方根

1) 8 点全点重み付けあり

v(km/sec)	latitude	longitude	time	R.M.S
1.5	32.4710	131.2422	36.48	5.98
1.6	32.4713	131.2485	37.49	5.73
1.7	32.4716	131.2547	38.36	5.64 *
1.8	32.4721	131.2608	39.13	5.68
1.9	32.4726	131.2666	39.81	5.81
2.0	32.4733	131.2723	40.42	5.99
2.1	32.4741	131.2778	40.96	6.22
2.2	32.4750	131.2829	41.45	6.46
2.3	32.4761	131.2879	41.89	6.72
2.4	62.4774	131.2927	42.29	6.98

2) 5 点全点重み付けあり

v(km/sec)	latitude	longitude	Time	R.M.S
1.5	32.4918	131.2374	36.49	3.10
1.6	32.4931	131.2436	37.35	2.74
1.7	32.4943	131.2497	38.12	2.45
1.8	32.4955	131.2558	38.79	2.23
1.9	32.4967	131.2618	39.39	2.08
2.0	32.4978	131.2677	39.92	1.98
2.1	32.4990	131.2736	40.40	1.92
2.2	32.5000	131.2794	40.83	1.91 *
2.3	32.5014	131.2851	41.22	1.92
2.4	32.5026	131.2908	41.57	1.96
2.5	32.5039	131.2964	41.90	2.02
2.6	32.5053	131.3020	42.19	2.09

3) 4 点全点重み付けあり

v(km/sec)	latitude	longitude	time	R.M.S
1.5	32.4910	131.2559	37.29	1.84
1.6	32.4919	131.2621	38.10	1.38
1.7	32.4929	131.2681	38.81	0.96
1.8	32.4939	131.2740	39.44	0.60
1.9	32.4949	131.2798	39.99	0.26
2.0	32.4960	131.2855	40.48	0.04 *
2.1	32.4971	131.2910	40.92	0.31
2.2	32.4984	131.2965	41.31	0.56
2.3	32.4997	131.3018	41.67	0.78
2.4	32.5012	131.307	41.99	0.99
2.5	32.5028	131.3121	42.28	1.19
2.6	32.5047	131.3170	42.54	1.36

4) 3 点全点重み付けなし

v(km/sec)	latitude	longitude	time
1.5	32.4700	131.3116	39.26
1.6	32.4742	131.3071	39.64
1.7	32.4787	131.3021	39.96
1.8	32.4838	131.2968	40.20
1.9	32.4897	131.2908	40.36
2.0	32.4968	131.2839	40.43
2.1	32.5059	131.2756	40.37
2.2	32.5189	131.2648	40.11
2.3	32.5407	131.2483	39.4

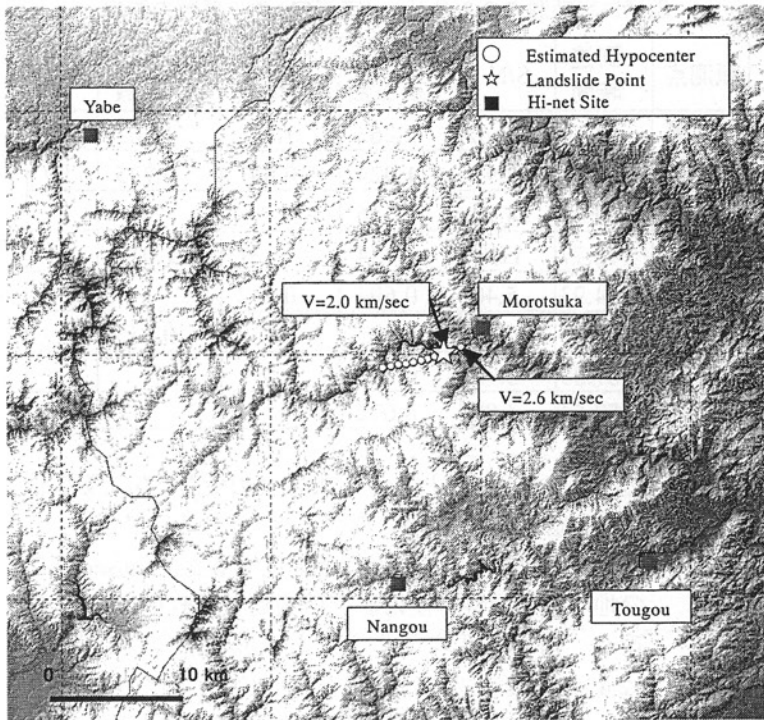


図8 Hi-net 観測点と推定震源位置

7. まとめ

- 1) 振動センサーの情報により、河道閉塞を生じた崩壊時刻が明瞭となった。既存ダム流入量等と連動することによって早期警戒に役立つものと思われる。
- 2) 河道閉塞が決壊したと思われる時刻に対応する振動波形は得られていない。この原因としては、河道閉塞決壊の進行がなだらかであったことが考えられる。
- 3) 防災科学技術研究所の Hi-net 振動計では、40 km 離れた地点でも振動が検知されており、それらの記録から崩壊位置推定を行った結果、崩壊地脚部から約 1.4 km 離れた位置に求まった。崩壊位置から観測点まで 30 km 離れている今回のような場合には位置推定精度には限界がある。
- 4) 土砂崩壊の振動は、非定常スペクトルから、1 Hz 付近の成分であった。これは、他の崩壊で観測された事例同様、低い振動数であったことに調和する。

8. 今後の課題

今回のイベントが発生した時刻は、台風が通過した数時間後のイベントであり、宮崎県南部の鰐塚での斜面崩壊推定時刻では台風通過によるノイズが地下 100 m 以下の Hi-net 振動計にも含まれており、このような状況下における当該技術の適用はフィルタリング技術が不可欠である。

謝辞：本研究には防災科学技術研究所による Hi-net (高感度地震観測網) のデータを利用させていただきました。また、土木学会調査団の宮崎大学工学部

土木環境工学科の村上啓介助教授には、貴重な写真をご提供いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kanamori, H., J.W.Given, and T.Lay, Analysis of seismic body waves excited by the Mount St. Helens eruption of May 18, 1980, *J.Geophys. Res.*, Vol.89, pp.1856 - 1866, 1984.
- 2) Brodsky, E E., Gordeev, E. and Kanamori, H., Landslide basal friction as measured by seismic waves, *Geophysical Research Letters*, Vol.30, No.24, 2236, 2003.
- 3) Kawakatsu, H., Centroid single force inversion of seismic waves generated by landslides, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. B9, pp. 12, 363-12, 374, 1989.
- 4) 水野高志, 伊藤潔, 諏訪浩:岡山県総社市における斜面崩壊にともなう地震動, 日本地震学会ニュースレター, Vol.13, No.1, pp.16-17, 2001.
- 5) 卜部浩, 東田進也:win- 微小地震観測網波形観測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会講演予稿集, No.1, C22-P18, 1992.
- 6) Hirata, N.and Matsu'ura, M., Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique,*Phys. EarthPlanet. Int.*, 47, pp.50-61, 1987
- 7) 谷口義信, 内田太郎, 大村寛, 落合博貴, 海堀正博, 久保田哲也, 笹原克夫, 地頭蘭隆, 清水收, 下川悦郎, 寺田秀樹, 寺本行芳, 日浦啓全, 吉田真也: 2005年9月台風14号による土砂災害, 砂防学会誌, Vol.58, No.4, pp.46-53, 2005.
- 8) 藤澤和範, 神原規也:土木研究所の月刊「土木技術資料」Vol.48, No.1 JANUARY 2006, pp.6-10.
- 9) 神山真:強震地震動の非定常スペクトル特性とその波動論的考察, 土木学会論文報告集, 第284号, pp. 35-48, 1979.4.
- 10) 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崩壊時のHi-netデータ解析 - 斜面崩壊検知への応用-, 自然災害科学, JJSND S24-3, pp.267-277, 2005.
- 11)大角恒雄, 浅原裕, 下川悦郎:2005年長野県白馬岳落石・崩壊の高感度地震観測網波形を用いた震源推定, 地すべり学会, Vol.5, 2006.
- 12) KiK-net 基盤強震観測網, 土質図 <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>

(2006. 5. 19 受付)