

山地河川における洪水時の地盤振動特性の評価

武澤永純* 山越隆雄** 石塚忠範*** 中谷洋明****

1. はじめに

2011年に発生した台風12号では、紀伊半島全域において記録的な豪雨が観測され、各地で大規模な崩壊や天然ダム等が発生した。このような規模の大きい土砂移動現象は発生時に地盤振動を生じることが知られており¹⁾、地盤振動を基に高感度な地震計ネットワークを活用して発生時刻や発生箇所、および規模を推定する試みがなされている²⁾。

このような高感度地震計の観測記録を見ると、例えば豪雨・洪水時において地震計のホワイトノ

イズが増加することが確認できる。ホワイトノイズの増加はSN比の低下に直結することから、前述のような地盤振動の利活用において支障をきたすことが考えられる。しかし、この現象が何に起因して生じるのかは明らかにされていない。

一方、山間地に設置される地震計は、平坦地が

表-1 検討ケース

ケース	A	B	C	
観測時期	2004/9/29	2007/7/6	2008/6/22	
観測所	流量 (国交省)	用瀬	妙見橋	多良木
	地震計 (Hi-net)	智頭	白水	上
	設置深さ (km)	0.20	0.11	0.18
地震計に対する流量 観測所・河川との 位置関係	地震計から流量 観測所までの 直線距離(km)	9.2	9.7	5.8
	地震計周辺にある 河川と地震計から の距離	千代川 1.3km	白川 1.2km	球磨川 2.8km

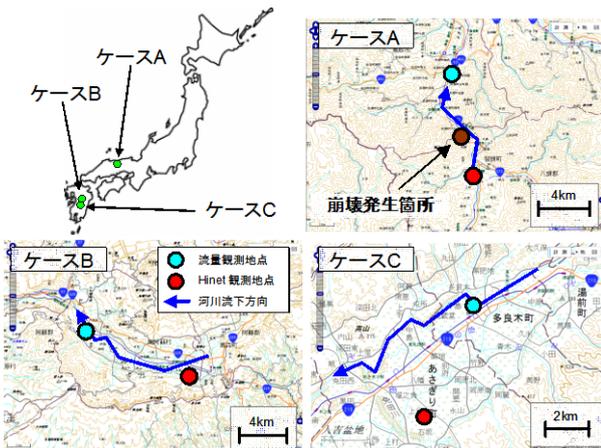


図-1 各ケースにおける流量観測地点とHi-net観測地点 (国土地理院発行数値地図200,000 (地図画像) を基図)



写真-1 Hi-net観測地点 (白水)

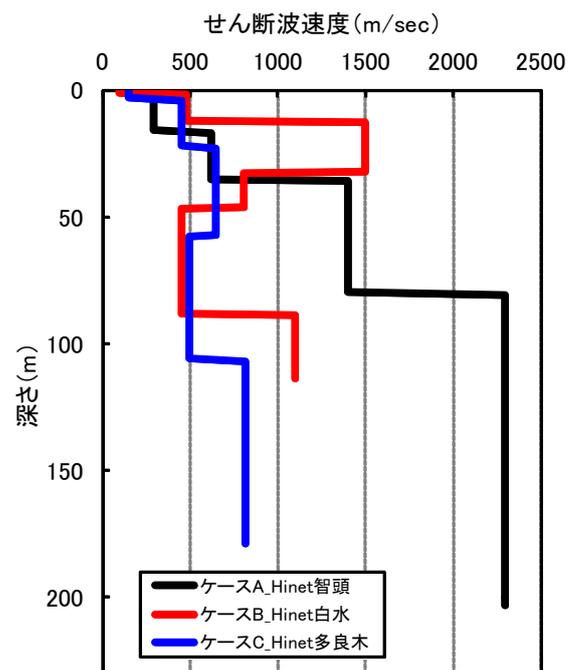


図-2 Hi-net観測地点のせん断波速度深度分布

Study on characteristics of ground vibration during times of flooding in mountainous rivers

少なく、かつ既設の電気・通信設備の有無等に制約を受けるためか、山地河川に近い箇所に設置されているものもある。そのような地震計は、豪雨時は山地河川の洪水に起因した振動も観測している可能性が考えられる。

そこで、本研究は山地河川で観測された流量データとその同時期の振動データを用いて、豪雨時のホワイトノイズを分析するとともに、振動イベントに対する比較を行った。

2. データセット

2.1 対象事例

本研究で対象とする流量観測所と（独）防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）の観測地点の位置関係を図-1、観測地点の設置状況の一例を写真-1に示す。国土交通省水文水質データベース³⁾に掲載されている流量観測地点と同時期にHi-net観測地点が運用されている事例のなかから、比較的大きな流量イベントが観測されている3ケースを検討対象事例とした（表-1参照）。

各ケースにおけるHi-net観測地点の深度方向のせん断波速度の分布を図-2に示す。対象とする観測地点を比較すると、ケースA（Hi-net智頭）は地震計の設置箇所は深く、設置個所のせん断波速度は相対的に高い層にあり、ケースB（Hi-net上）は比較的地震計の設置箇所は浅く、設置個所のせん断波速度は相対的に低い層にあり、ケースC（Hi-net白水）は比較的地震計の設置箇所は深く、設置個所のせん断波速度は相対的に低い層にあることがわかる。

2.2 検討方法

対象期間は国土交通省水文水質データベースに基づいて1時間当たりのピーク流量が高い事例を3日間抽出した。対象期間の振動観測記録は式(1)によって整理した。式(1)は鉛直方向の速度振幅の2乗値について、1分単位で累積したものを各分の代表値（ $V(t)$ ）とした。

$$V(t) = \sum_{i=0}^n v^2(t) dt \quad \dots \dots \text{式 (1)}$$

ここで、 v ：速度振幅(mkine)、 n ：データ数（サンプリング100Hz×60sec=6000data）、 t ：対象時間（sec）である。

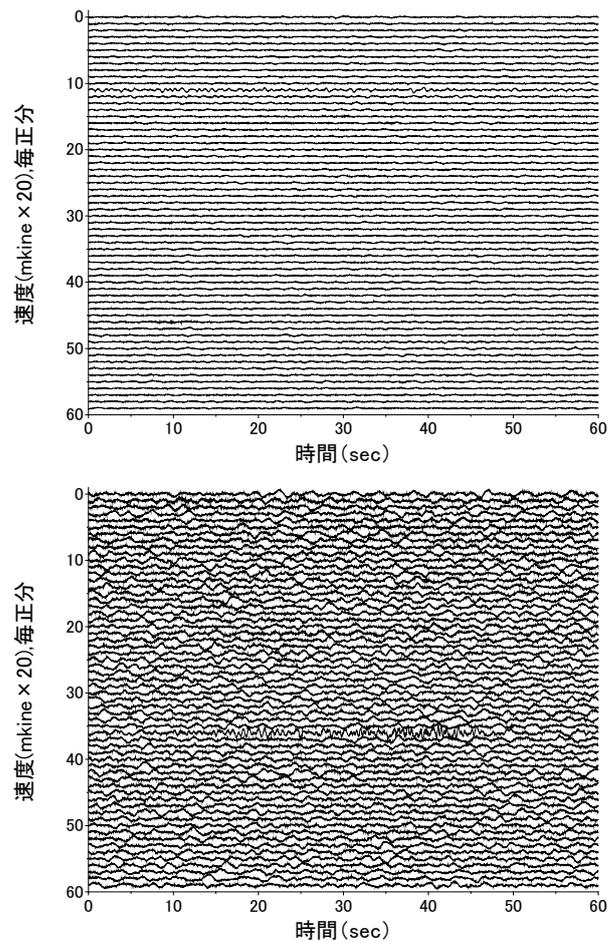


図-3 Hi-net智頭における時刻歴波形
(上：2004/9/29 0:00~1:00, 下：2004/9/29 20:00~21:00)

3. 検討結果

3.1 流量と振動の関係

図-3にHi-net智頭における1時間ごとの時刻歴波形を示す。図-3は1時間の上下方向（振幅値は20倍している）の波形記録を1分毎に60分割し、図を上から下に時間順に標記している。図-3より下の図は上の図より、振幅値が全体的に大きいことがわかる。また、この観測地点付近を流れる千代川では、後述の通り、0:00~1:00と20:00~21:00では流量が著しく異なっていた。

図-4に図-3で指摘した振動の大きさの違いを分析するために、対象事例の1分単位の振幅値と観測されたハイドログラフを示す。対象期間において縦軸のスケールを超過するものについては、Hi-netにおいて毎日9:00に発出される検査信号および対象期間中に観測された微小な地震の影響が考えられる。図より、どの事例でも流量が増加

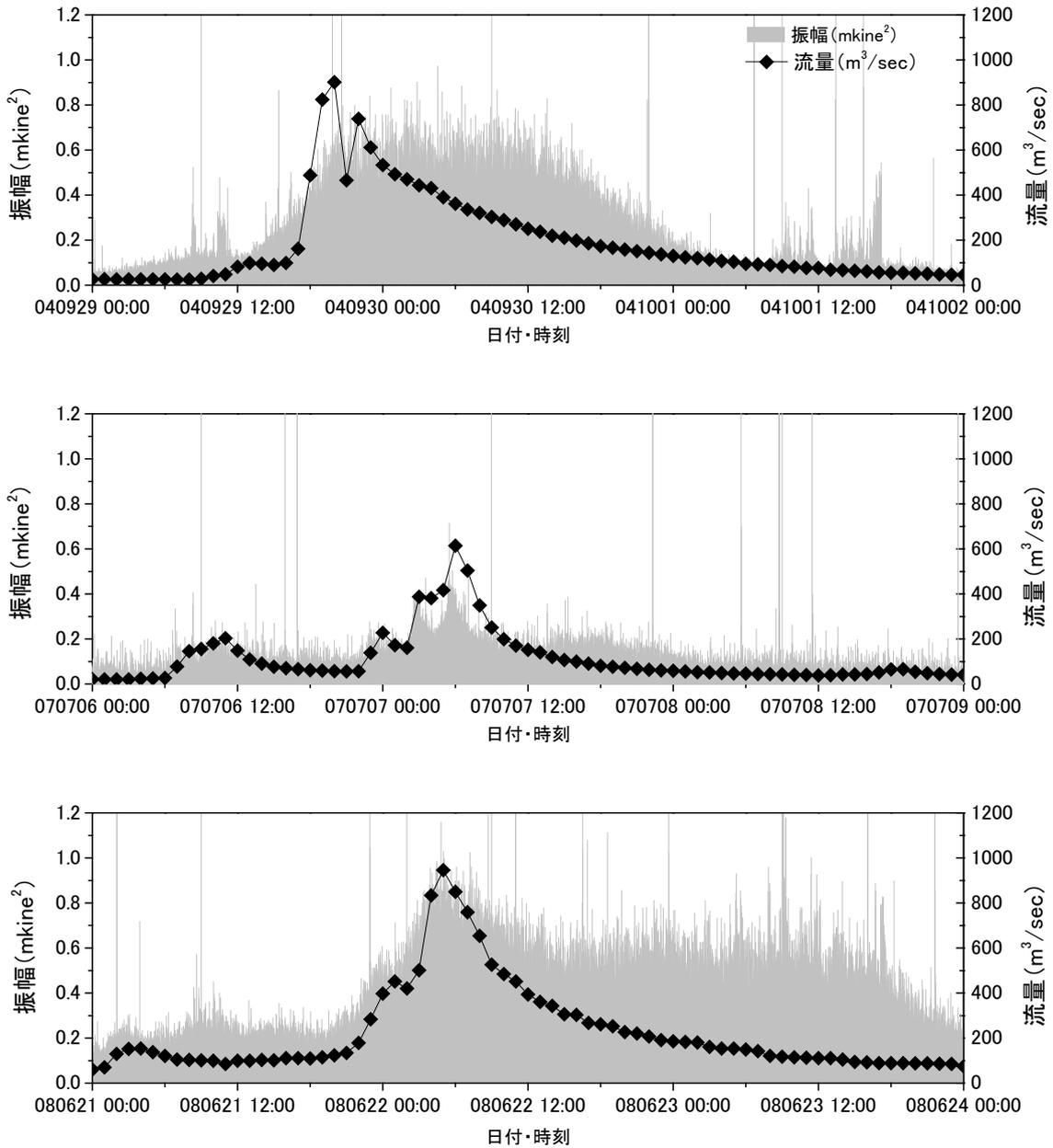


図-4 各ケースのハイドログラフと振幅値（上からケースA, B, C）

するのに伴い、速度振幅値が増加していることがわかる。また、ケースBでは、7月7日に流量の増加が3回確認できるが、Hi-net白水の速度振幅も振幅の増加が3回確認できる。一方、流量がピークにいたった後をみると、ケースBは流量の低下とともに速度振幅は低下するが、ケースAはピーク流量を示した時間帯から18時間、ケースCはピーク流量を示した時間帯から34時間経過した段階で低下し始めることがわかる。

ここで、前後30分間で平均した1秒間の振幅値について、ピーク流量時、ピーク流量より前12時間、ピーク流量を経過した後の12時間に区分

し、流量データと比較したものを図-5に示す。なお、前述のとおり、観測期間中に地震が発生したことにより、急激に振幅が大きくなっているため、それらの影響を排除するために、各分において前後30分間の平均値を算出し、その1.5倍より大きい値が観測されていた場合はデータを棄却している。図-5より、ピーク流量より前12時間の振幅値は流量値が大きくなるほど振幅値が大きくなる。しかし、ピーク流量を経過して12時間の振幅値はケースごとに異なる。つまり、流量が減少しても振幅値が低下しないケース（ケースA）、流量の減少に対して振幅値はピーク流量前と同じ傾向

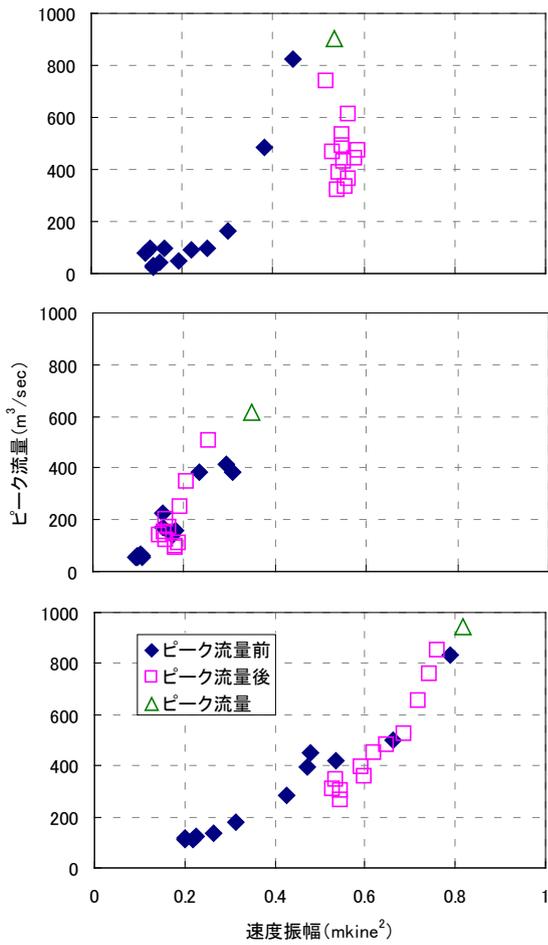


図-5 ピーク流量前後の流量と振動の関係 (上からケースA, B, C)

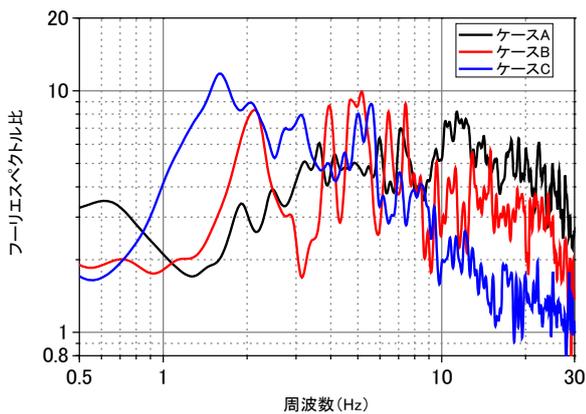


図-6 各観測地点のピーク流量時のフーリエスペクトル比

で低下するケース (ケースB)、流量減少に対して振幅値はピーク流量前と異なった傾向で低下するケース (ケースC) が見られた。なお、ピーク流量到達前およびピーク流量時のデータを用いて累乗の近似曲線を算出した結果ケースA, B, C

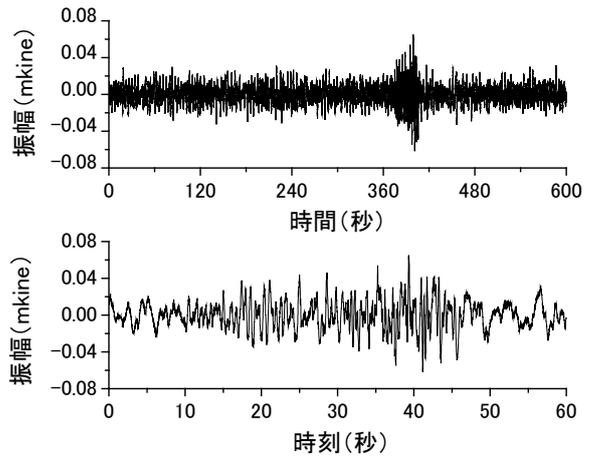


図-7 Hinet智頭における9月29日20:30~20:40の時刻暦波形 (上) と20:36~20:37の時刻暦波形 (下)

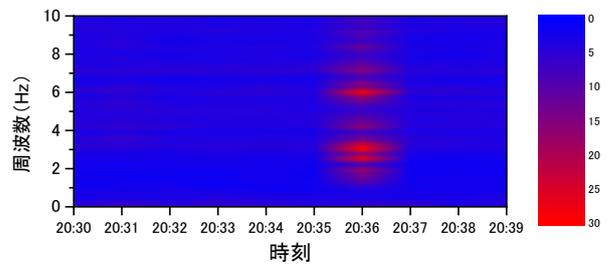


図-8 Hinet智頭における9月29日20:30~20:39における周波数特性 (コンターの色はフーリエスペクトル比を表す)

の相関係数はそれぞれ0.79、0.94、0.98であり、流量と振動は高い相関を有していることがわかった。

3.2 ピーク流量時の振動特性

図-6に各ケースにおけるピーク流量を観測した時間のフーリエスペクトルを平常時のフーリエスペクトルで除した結果を示す。平常時は観測地点において、豪雨・地震等の影響がない時間帯を抽出した。ピーク流量時および平常時のスペクトルは40.96秒を対象に、0.4HzのParzenウィンドウを施している。図より各ケースにおいてスペクトル比のピークに大きな違いは見られなかった。スペクトル比が高い値を示す周波数領域は、ケースAは10~20Hzの範囲、ケースBは2~8Hz、ケースCは1~6Hzであった。また、ケースCは10Hz以上においてスペクトル比の顕著な低下がみられる。

これより、ピーク流量時における振動特性は観

測地点で異なると考えられる。なお、ケースAの地震計の設置箇所は他の2地点よりせん断波速度が高い地盤に設置されており、ピークを示す周波数帯域が高いことと調和的である。ケースBはケースAよりもせん断波速度が低い地盤に設置されており、周波数帯域がケースAよりも低くなった結果と符合する。ケースCはケースAよりせん断波速度が低い地盤に設置されていることと、地震計設置位置が深く、河川とHi-net観測地点との距離が他の2ケースより遠い(表-1より、Hi-netから球磨川までの距離は2.8km)ことから、距離減衰により高い振動数帯域が減衰した可能性が考えられる。

3.3 洪水時における土砂崩落イベントの振動特性について

図-4のケースAにおいて、9月29日の20時から21時にかけて流量が $901\text{m}^3/\text{sec}$ から $465\text{m}^3/\text{sec}$ に低下していることがわかる。一方、用瀬観測所から約6km上流の市瀬地区において、20:36に崩壊が発生した。崩落土砂量 $330,000\text{m}^3$ のうち、 $43,000\text{m}^3$ が千代川に流入し、その後上流の市瀬地区で浸水被害が発生した⁴⁾ことから、流量の低下はこの崩壊土砂によって河道が閉塞されたことによる影響と考えられる。そこで、崩壊発生箇所から上流約4kmにある、Hi-net智頭の時刻暦波形を図-7に示す。図より、20:36ごろに最大 0.065m/kine のシグナルが確認でき、20:36:20から20:36:50の概ね30秒間振動が継続していることがわかる。図-8に9月29日20:30~20:40における周波数特性を示す。コンター図は各時間のフーリエスペクトルを平常時のフーリエスペクトルで除した結果を示す。これより、20:36において2~6Hzの振動数においてフーリエスペクトル比が高くなることがわかり、それ以外の時間帯においては20:36よりもフーリエスペクトル比が高くないことがわかる。つまり、20:36において、豪雨時の振動とは異なるイベントが観測されていることがわかる。ここで、大角らによれば、奈良県大塔村で発生した崩壊による振動は2Hz付近の振動が卓越していたことを指摘している⁵⁾。また、Yamada et.alは奈良県五條市の赤谷地区で発生した振動について1~4Hzのバンドパスフィルタを用いてシグナルの抽出を行っている²⁾。これらを踏まえると、20:36に卓越した振動数帯域はや

や高めであるが、崩壊箇所からHi-net観測地点までの距離が約4kmと、既往研究^{2),5)}で観測された事例より近いことから、高い振動数帯域が減衰せずに観測地点まで到達したと考えられる。それらを踏まえると、20:36のシグナルは、当該箇所が発生した崩壊による振動である可能性が高いと考えられる。

なお、図-5よりケースAは10~20Hzの高い振動数帯域で卓越していることを指摘したが、既往研究で指摘されている土砂移動現象の振動数帯域、ならびに20:36のシグナルはそれよりも低い。1.はじめに、において、ホワイトノイズの増加はSN比の低下に直結することから、土砂移動現象の振動を観測するにあたって支障をきたすことを示した。一方、土砂移動現象の規模や土砂移動現象の発生地点と地震計との距離によっては、洪水時においても土砂移動現象の振動を観測できると考えられる。

一方、当該箇所で行われた崩壊予測シミュレーション結果によれば、崩壊下部に設置されていた擁壁位置における土砂の通過速度は最大 $21.08\text{m}/\text{sec}$ であることが指摘されている⁶⁾。そして、当該地域における崩壊下端・上端から崩壊土砂が乗り上げた千代川対岸までの距離を地形図から読み取ると350~650mであった。一方、20:36の振動が最大値を示したタイミングは、崩壊土砂が地盤に最も大きい衝撃を与えたタイミング、つまり崩壊土砂が河床もしくは対岸に衝突した時と考えられる。そこで、20:36の振動が開始してから最大値を示すまでの時間を30秒と読み取ると、崩壊土砂の平均流下速度は $11.7\sim 21.7\text{m}/\text{sec}$ となる。この最大値は解析で得られた速度結果と調和的である。これより、観測された振動波形は土砂移動の実態を解明するための基礎資料になりうるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、山地河川で観測された洪水流量とその周辺で観測された地盤振動観測記録を分析した。その結果、高感度な地震計は洪水時の振動を観測しているものと考えられる。また、観測地点の地盤特性の違いにより振動と流量の関係や振動特性は異なることがわかった。一方、本研究で対象とした観測地点において、ピーク流量が到達す

る前において振動の大きさが増加する傾向はどの観測地点でも同じであったことから、その傾向に着目すれば、振動振幅から洪水流量を予測できる可能性があると考えられる。

なお、土砂災害を引き起こす土砂移動現象を分析する際、現象を計測機器等で観測している事例はほとんどないことから、住民の目撃証言や現地に残された痕跡を調査することによって、土砂移動現象を推定するアプローチが一般的である。一方、本研究で示したように、既存の地震計ネットワークで観測された振動波形から土砂移動現象の特徴が分析できるようになれば、現象をリアルタイムで観測できることになり、土砂移動現象の実態の解明に寄与するものと考えられる。今後も土砂移動現象に伴う地盤振動と実態の関連性について、検討を行っていきたい。

謝 辞

本研究の検討に当たっては、(独)防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)の地震観測データを利用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

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.,89, 1856-1866, 1984
- 2) Yamada, M., Y. Matsushi, M. Chigira, and J. Mori (2012). Seismic recordings of the Landslides caused by Typhoon Talas, Geophysical Research Letters, Vol.39, L13301, doi:10.1029/2012GL052174.
- 3) 国土交通省水文水質データベース：
<http://www1.river.go.jp/>
- 4) 小田原聡志、牧野裕至：市瀬地すべりと一級河川千代川に関する検討（Ⅰ.地すべりの崩落過程と避難）、第44回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.173～176、2005
- 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、Vol.24、No.3、pp.267～277、2005
- 6) 西土井一宏、牧野裕至：市瀬地すべりと一級河川千代川に関する検討（Ⅱ.地すべり対策としての待受け擁壁）、第44回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.177～180、2005

武澤永純*



独立行政法人土木研究所
企画部研究企画課（前
独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管
理研究グループ火山・土
石流チーム研究員、博（
工））
Dr.Nagazumi TAKEZAWA

山越隆雄**



国土交通省水管理・国土
保全局砂防計画課地震火
山砂防室補佐（前 独立
行政法人土木研究所つく
ば中央研究所土砂管理研
究グループ火山・土石流
チーム主任研究員、博
（農））
Dr.Takao YAMAKOSHI

石塚忠範***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管
理研究グループ火山・土
石流チーム 上席研究員
Tadanori ISHIZUKA

中谷洋明****



国土交通省中部地方整備
局天竜川上流河川事務所
長（前 国土交通省水
管理・国土保全局砂防計
画課企画専門官、博（農））
Dr.Hiroaki NAKAYA