

## 山地流域における定量的な掃流砂量計測

### Quantitative Observation of Bed-load in Mountainous Streams by Hydrophones

堤大三・野中理伸<sup>(1)</sup>・水山高久<sup>(2)</sup>・志田正雄・市田児太朗・宮田秀介・藤田正治

Daizo TSUTSUMI, Michinobu NONAKA<sup>(1)</sup>, Takahisa MIZUYAMA<sup>(2)</sup>, Masao SHIDA, Kotaro ICHIDA,  
Shusuke MIYATA and Masaharu FUJITA

(1) 株式会社ハイドロテック

(2) 京都大学大学院農学研究科

(1) HydroTech. Co.

(2) Graduate School of Agriculture, Kyoto University

#### Synopsis

During several sediment movement events, relationship between hydrophone acoustic energy versus bed load measured by pit sampler was obtained. From the relationship between acoustic energy measured by hydrophone and bed load measured by pit sampler, simple calibration curve was obtained, and continuous quantitative monitoring of bed load has become roughly possible. Four streams, Kurodani, Shiramizudani, Warudani and Hirudani, branch off from main stream of the Ashiaraidani. At upstream of each branching points, pipe hydrophones are installed and acoustic energy have been monitored for several years, similar to the main stream of Ashiaraidani. By applying the simple calibration curve obtained at the Ashiaraidani station to the other four observation stations, evaluation of sediment balance can be considered.

**キーワード:** ハイドロフォン, 掃流砂, 山地流域, ピット流砂量計, キャリブレーション

**Keywords:** hydrophone, bed-load observation, mountainous stream, pit sampler, calibration

#### 1. はじめに

土砂災害の防止・軽減や, 山地から河口へとつながる流砂系の総合的な土砂管理のためには, 河川要所での流砂量を把握する必要がある. 中下流域においては, 河床に十分な量の土砂が堆積しているため, 流砂量式を用いて流量から流砂量を計算することが可能である. 一方, 山地域においては, 河床に堆積している土砂量に限りがあり, 土砂供給量が上流域における土砂生産に支配される場合が多いことや, 山地河川特有の複雑な河床形状を表現することが難

しいことから, 流砂量式によって正確な流砂量を計算することができない. そのため, 特に山地流域において流砂量を計測することが重要である.

間接的な流砂量計測手法の一つであるパイプハイドロフォンは, 河床に設置した金属管に掃流砂が衝突する音をパイプ内のマイクロフォンが検地し, そのパルス数をカウントすることで流砂量の相対的な大小を知ることができるというもので, 衝突パルスの他に, 衝突による音響波形の強度を記録することも可能であり, 20年程前から日本やヨーロッパにおいて開発・検討されてきている. (Baezinger and Burch,

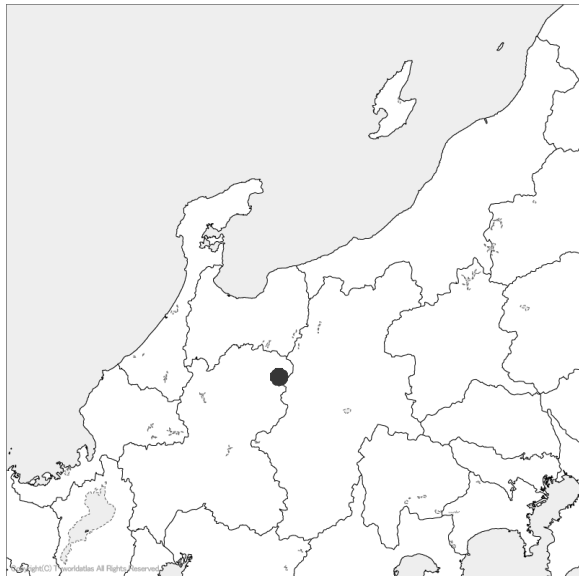


Fig. 1 Location of Ashiaraidani watershed in Northeast region of Gifu prefecture, Main Island, Japan

1990; Rickenmann, 1992; 水山ら, 1996) .

岐阜県北東部に位置する京都大学防災研究所附属流域災害研究センター穂高砂防観測所の観測流域、足洗谷においても、このハイドロフォン流砂量計を各所に5個設置し、出水イベント中における山地流域での掃流砂動態の解明を目的に計測を行っている(堤ら, 2008 ; 堤ら, 2010). 足洗谷はその源流に活火山焼岳をもち、流域における土砂が活発であると同時に、土砂流動が非常に活発な流域である。5か所のハイドロフォンの内、最下流の足洗谷水路におけるハイドロフォン直下流にはピット流砂量計を設置しており、ハイドロフォンパルスや音響波形とピット流砂量計によって計測される掃流砂量とのキャリブレーション関係を求める事が可能である。2011年から2012年にかけて数回の降雨イベントが発生し掃流砂が観測されたが、これらの内、2011年9月、2012年7月と8月のイベントでは、ピット流砂量計によって定量的な掃流砂観測が可能であったため、良いキャリブレーション関係を得ることができた。これらの関係を、足洗谷以外に設置されたハイドロフォンにも適用することで流域全体の流砂量収支を検討することが可能となり、その検討を行った。

## 2. 観測流域

岐阜県の北東部に位置する足洗谷流域をFig. 1に示す。流域の周囲は標高3,000 m級飛驒山脈に囲まれており、その源流部には、活火山である焼岳(標高2,455 m)や割谷山(同2,224 m)がそびえている。足洗谷の流域面積は約7 km<sup>2</sup>であり、南東方向から北西

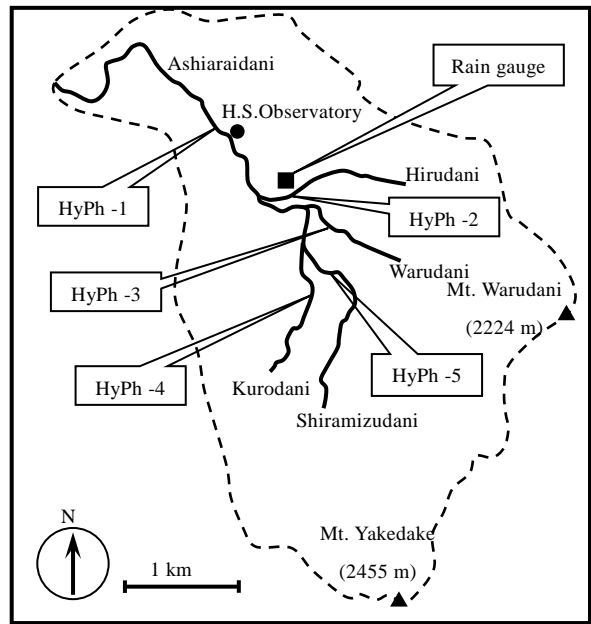


Fig. 2 Map of the Ashiaraidani watershed and location of the hydrophones in the watershed.

方向に向かって流下し、標高1,050 mで蒲田川に合流している(Fig. 2参照)。流域内には多数の裸地斜面が散在しており、活発な土砂生産活動に伴ってそれらの斜面から大量の土砂が流域に供給され、融雪出水時や梅雨・台風による降雨出水時には、活発な土砂移動が見られる。足洗谷には、ヒル谷、割谷、白水谷、黒谷という4支川があり、本川の足洗谷と4支川の合計5箇所ハイドロフォンが設置されている。

(Fig. 2参照)。足洗谷本川では、長方形コンクリート水路の末端にハイドロフォンが設置され、その直下流には、ピット掃流砂採取装置が連続して設置されている。割谷、白水谷、黒谷においては、ハイドロフォンはそれぞれ砂防ダムの水通し部に設置されている。ヒル谷においては、ハイドロフォンは試験堰堤上流の沈砂池流入部のコンクリート上に設置されている。白水谷を例に、ハイドロフォンの設置状況をFig. 3に示す。センサー部はステンレス製のパイプで、その内部にマイクロフォンが設置されており、センサー部に衝突する土砂の音を感知できるような構造になっている。ハイドロフォンセンサー部のパイプは川の流下方向と直角に設置され、下半分は河床のコンクリートに埋設され、上半分は流水中に露出している。ハイドロフォンセンサー内のマイクロフォンはデータロガーに接続されており、検地された流砂パルスはロガーに記録される。

ただし、ハイドロフォンパルスの計測方法では、掃流砂量が一定量を超えて衝突すると、パルスの飽和が生じ、実際よりもパルス数を少なくカウントしてしまうという欠点がある。このため、掃流砂の衝突パルス数をカウントするのではなく、衝突の際に

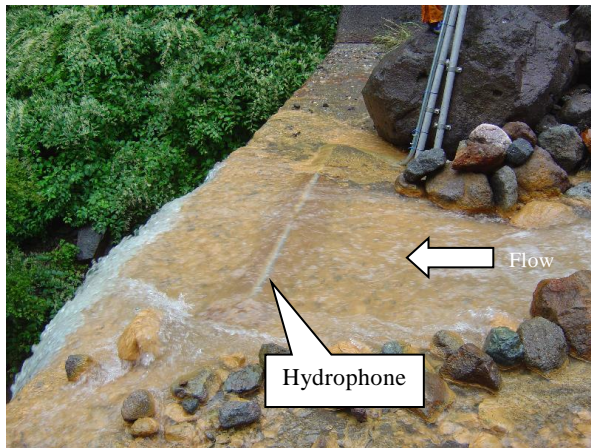


Fig. 3 The hydrophone installed on the dam site of Shiramizudani.

発生する音響波形の強度を記録するという方法も実施されており、本研究では音響波形を記録するという手法を主に採用した。

### 3. 観測されたハイドロフォン音響波形

2011年から2012年にかけての観測の内、2011年9月、2012年7月、8月の3回の降雨イベントでは、足洗谷観測地点のピット流砂量計によって良好に流砂量を観測することができた。Fig. 4にそれぞれの降雨イベントのヒル谷雨量計によって計測された降雨波形と積算降雨量を、Fig. 5-7にそれぞれイベントにおける水位、濁度、ハイドロフォン音響波形、ピット流砂量計の観測結果を示す。Fig. 4を見ると、3つの降雨イベントの内、2011年9月のものは最大降雨強度は大きくないものの、総降雨量が200mmを超えており、比較的大きなイベントであったことがわかる。一方で、2012年の7月と8月のイベントは総降雨量が100mm、75mmと小規模な降雨イベントである。

降雨規模の大小に対応して、Fig. 5-7において水位上昇、濁度にも違いが見られ、やはり2011年9月の降雨イベントによる水位上昇が大きい事が示されている。さらに、ハイドロフォンによる音響波形も大きくとらえられており、掃流砂量が相対的に多いことが定性的に示されている。

### 4. ハイドロフォン音響波形とピット流砂量計による掃流砂量との関係

先に示した通り、足洗谷水路のハイドロフォンとピット流砂量計により、2011年9月、2012年7月、8月の3回の降雨イベントにおいて、音響波形と掃流砂量の両方が良好に観測されている。Fig. 5-7の下図は、ピット流砂量計内の重量変化とその差分によって求

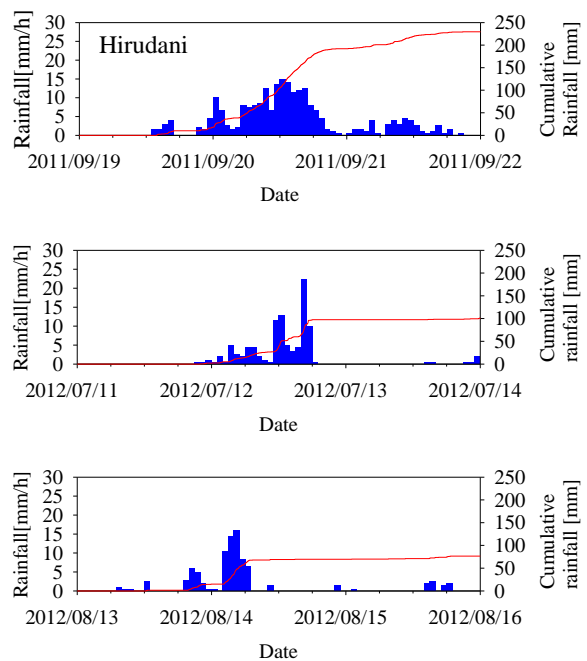


Fig. 4 Measured rainfall data at Hirudani station at three different rainfall events from 2011 to 2012.

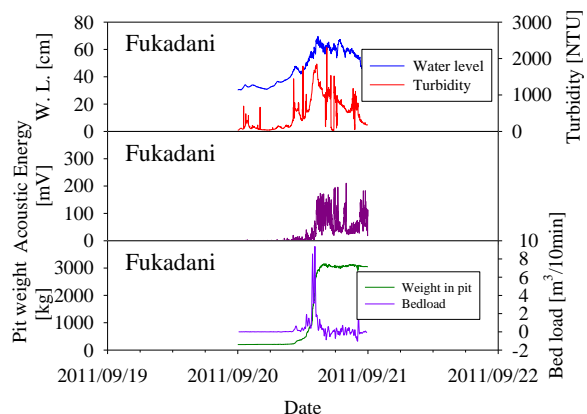


Fig. 5 Measured data at Ashiarai-dani station on September, 2011.

めた流砂量を表わしている。図から明らかなように、ピット流砂量計の重量変化は、降雨イベントが継続し、ハイドロフォンによる音響波形に変化が見られるにもかかわらず、イベントの初期段階で上限に達し、一定値を示すようになる。これは、ピットが流砂で満杯になり、それ以降はピットに流砂が流入することなく、計測が終了したことを示す。このように、掃流砂計測における直接法では、連続して継続的に掃流砂を計測することができず、限られた時間内での計測に限定されてしまうという欠点がある。この事が、2011年から2012年にかけて複数回の降雨イベントがあった内の3回のみ掃流砂量観測が可能であった事の理由でもある。

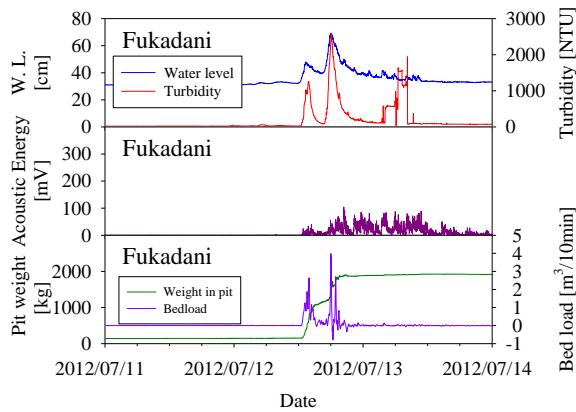


Fig. 6 Measured data at Ashiarai-dani station on July, 2012.

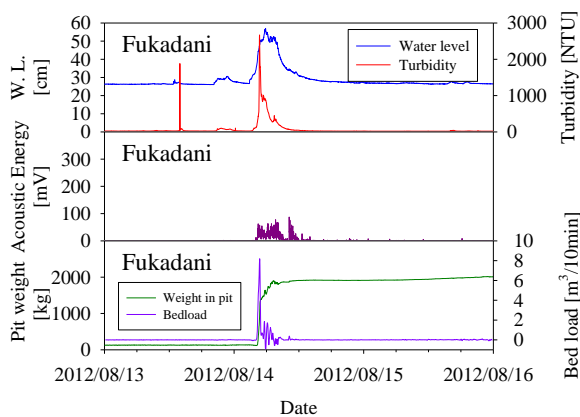


Fig. 7 Measured data at Ashiarai-dani station on August, 2012.

しかしながら、この3回の降雨イベントにおいては、イベント初期に限られた時間内ではあるが、ピット流砂量計の重量変化の差分値から直接的に掃流砂量が計測されており、その間のハイドロフォンによる音響波形との関係を見るのが可能となった。ハイドロフォン音響波形の強度とピット流砂量計による掃流砂量との関係を、イベント毎にFig. 8 - 10にそれぞれ示す。イベントの規模に従って、横軸の音響波形の強度と縦軸の掃流砂量の範囲が異なるが、全てのイベントにおいて明確な線形関係が表れている。細かい点を見ると、音響波形、掃流砂量ともに小さな領域では、どちらかという線形関係の傾きが小さく、全体としては完全な直線関係というよりは、下に凸の曲線の様に見える。ただし、下に凸の曲線となる理論的な根拠も不明なため、ここでは直線近似を行い、それぞれの図中に記入している。曲線の傾きは、それぞれ0.0174, 0.0086, 0.0196となり、2012年7月のイベントでは、他よりも小さな傾きである。これは、Fig. 6に示されているように、ピットが満砂

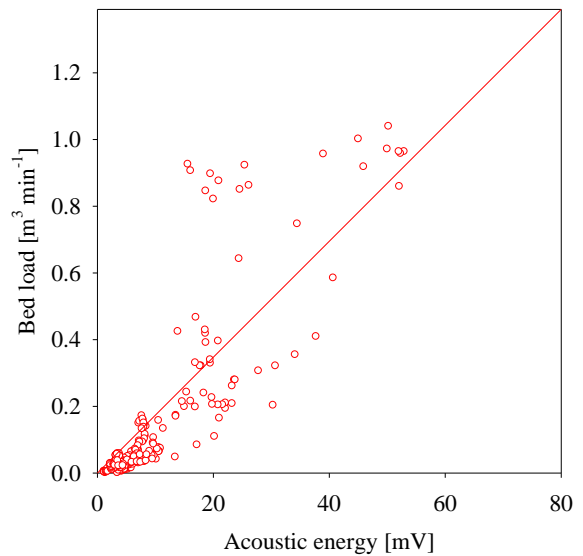


Fig. 8 Relationship between acoustic energy and bed load measured at September, 2011.

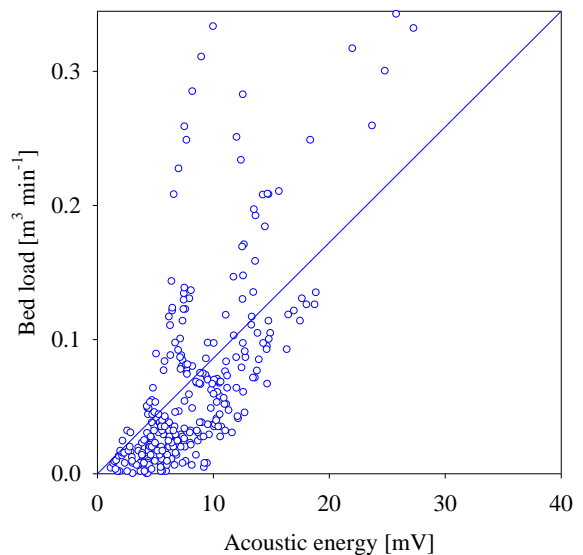


Fig. 9 Relationship between acoustic energy and bed load measured at July, 2012.

状態になるまでに比較的長時間を要していることからFig. 9に示されているように音響波形、掃流砂量ともに小さなプロットが多くなったため、それらのプロットからより大きく影響を受けたためであると考えられる。

次に、降雨イベントの別に関わらず、音響波形と掃流砂量との関係をまとめてプロットした関係をFig. 11に示す。Fig. 11においても、良好な線形関係が見られ、時期や規模の異なる複数の降雨イベント間でも、ハイドロフォンによって計測される音響波形と実際の流砂量との間には、比較的安定した一定の相

関係があることが示された。本来であれば、降雨イベントの規模によって水深や流量、流速が異なり、また流砂の材料となっている土砂の粒径等も事になっているため、ハイドロフォンによって計測される音響波形と実際の掃流砂量とは時間や場所によって異なる相関を示す可能性が大きいと考えられてきたが、Fig. 11に示されたように、巨視的に見ると一定の関係が得られていることから、あまり神経質にイベント規模や流砂材料を細分化しなくてもよいと考えられる。また、同様の理由から、ハイドロフォンの設置状況が統一されていれば、異なる場所で得られた相関関係を統一的に使用できる可能性も示されている。なお、Fig. 11に示された近似直線の傾きは0.0157となった。

## 5. キャリブレーション結果を用いた流域全体での掃流砂量収支に関する検討

前章で述べたとおり、足洗谷水路において得られたハイドロフォン音響波形の強度とピット流砂量計の流砂量の相関関係を用いて、黒谷、割谷、白水谷の各ハイドロフォンの音響波形から流砂量を求め、流域全体での土砂収支に関して検討する。なお、4支流の内の一つであるヒル谷に関しては、ハイドロフォンによる観測は行っているが、ハイドロフォンを通過した土砂は、直下流部の試験堰堤に堆砂し、直接、足洗谷水路へは到達しないため、ここでは検討から省いている。

2011年から2012年に観測された3回の降雨イベントによる土砂移動について、それぞれFig. 12 - 14に示す。Fig. 12に示される2011年9月のイベントでは、各支流での土砂移動ピーク後に本流の足洗谷で大規模な土砂移動が計測され始めるという時間差が見られる。降雨がほぼ終了する9月21日午前0時以降も割谷と足洗谷では土砂流出がだらだらと継続する傾向が見られる。このような支流から本流への土砂移動の時間差、降雨終了後も土砂流出が継続する傾向は、Fig. 4に示したようにほぼ2日間にわたって長期継続し、総降雨量も多い降雨の特徴を反映しているものと考えられる。一方で、Fig. 13, 14に示されている2012年7月と8月のイベントでは、降雨終了後に本流の足洗谷や3支流における土砂流出は終了しており、Fig. 12に示したような傾向は見られない。また、土砂移動開始のタイミングも、本流の足洗谷と各支流では同じか、むしろ支流の方が遅いという傾向が見られ、支流で移動を開始した土砂が本流に到達しているというよりはむしろ、流域全体で同時多発的に流量の増加と土砂移動が発生している様相を呈している。これはやはりFig. 4に示した、短期間のうちに比較的

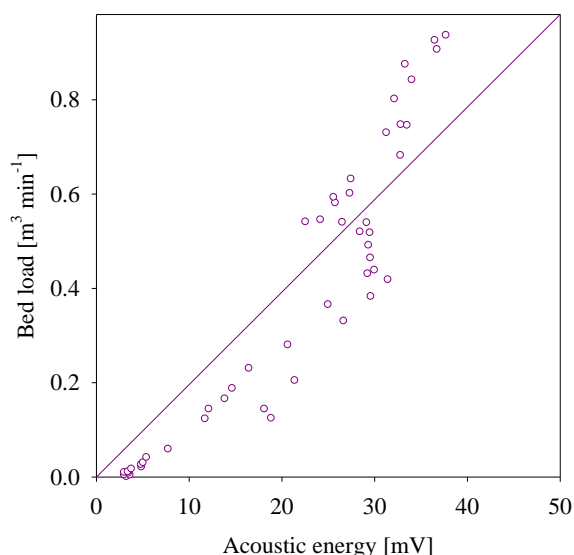


Fig. 10 Relationship between acoustic energy and bed load measured at August, 2012.

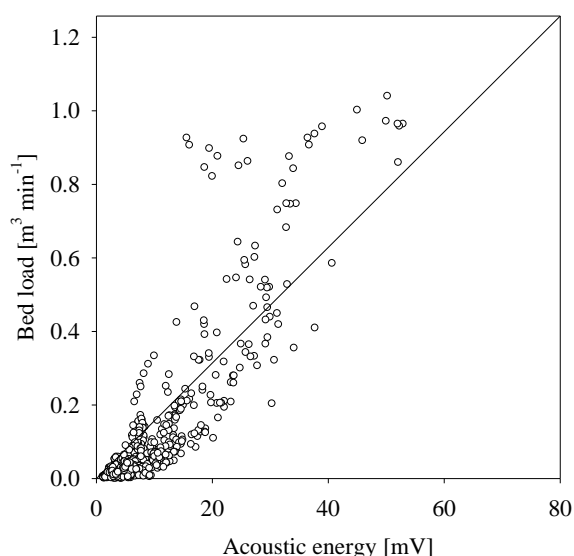


Fig. 11 Relationship between acoustic energy and bed load measured at the three events from September, 2011 to July, 2012.

高強度の降雨が流域全体にもたらされた降雨傾向を反映していると考えられる。

観測地点による土砂移動傾向の違いを比較すると、降雨イベントによって多少の差異は見られるが、概して割谷において流砂量が多く、黒谷、白水谷では少ない傾向が見られる。足洗谷では、2010年7月に比較的大規模な降雨イベントがあり、その際に割谷上流部で新規の斜面崩壊が発生し、2011、2012年の時点でその崩土が河道に残留しているため、土砂流出量が多い傾向にあると見られる。

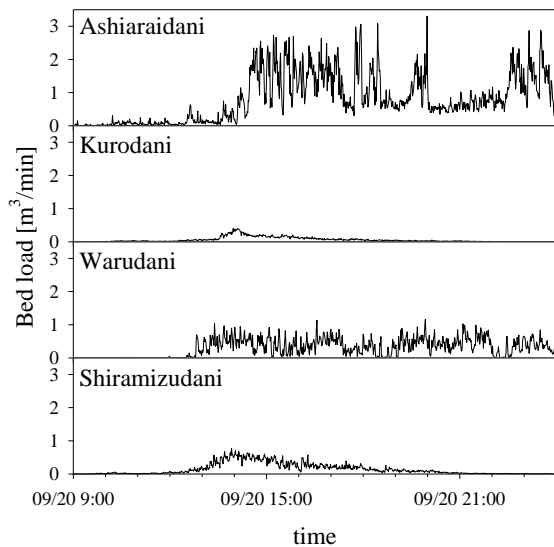


Fig. 12 Bed load at four stations, calculated by the measured acoustic energy and calibration curve, during the event of September 2011.

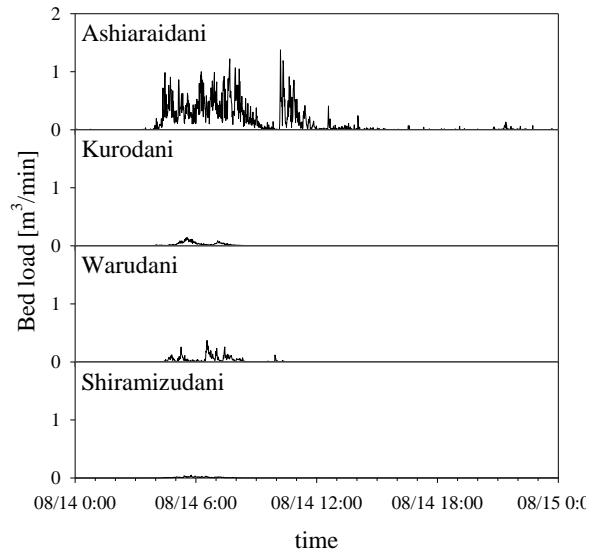


Fig. 14 Bed load at four stations, calculated by the measured acoustic energy and calibration curve, during the event of August 2012

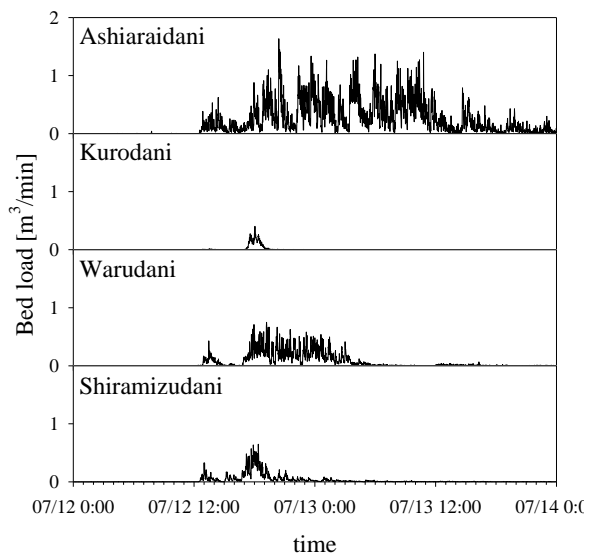


Fig. 13 Bed load at four stations, calculated by the measured acoustic energy and calibration curve, during the event of July 2012.

支流全体の土砂流出量合計と本流である足洗谷での土砂流出量を比較すると、全てのイベントにおいて、支流全体の土砂流出量合計は足洗谷の観測値を下回っている。各支流の観測点から本流の観測点までの間での河床変動（侵食・堆積）の複雑性を考えると一概には判断できないが、河床に存在する土砂や河岸の土砂が侵食されているか、小規模な溪流からの土砂流入が不足分を補っている傾向が示唆される。

## 6. まとめ

京都大学防災研究所附属流域災害研究センター穂高砂防観測所の観測流域である足洗谷流域において、5ヶ所にハイドロフォン流砂量計が設置され、2011 - 2012年に3回の降雨イベントによる土砂移動が観測された。その際、足洗谷では、ハイドロフォン音響波形とピット流砂量計による流砂量との関係が得られ、定量的な流砂量観測が継続的に実施されるようになった。また、その相関を用いて、足洗谷以外の観測点に適用し、流域全体における土砂移動の定量的観測や、それによる土砂収支の検討の可能性が広がった。今後も同様の観測を継続し、特に音響波形と流砂量の相関関係の詳細な検討を実施することで、より精密な流砂量の定量的観測を目指す。

## 参考文献

- 水山高久・野中理伸・野中伸久（1996）：音響法（ハイドロフォン）による流砂量の連続観測，砂防学会誌，49(4)，pp. 34-37.
- 堤 大三・水山高久・野中理伸・藤田正治・志田正雄（2008）：山地流域における土砂動態の定量的モニタリング手法の開発，京都大学防災研究所年報，第50号B，pp. 661-668.
- 堤 大三・平澤良輔・水山高久・志田正雄・藤田正治（2010）：山地流域における音響法を用いた流砂量観測，京都大学防災研究所年報，第53号B，pp. 537-543.

Baezinger, R and H. Burch (1990): Acoustic sensors (hydrophones) as indicators for bed load transport in a mountain torrent, Hydrology in Mountain Regions, 1-Hydrological Measurements; the Water Cycle, Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990, IAHS Publ. No. 193.

Rickenmann, D. (1992): Bedload transport and discharge in the Erlenbach, stream. COMTAG Meeting and Workshop.

(論文受理日 : 2013年6月10日)