

山地渓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

堤 大三・水山高久*・野中理伸**・藤田正治・志田正雄

*京都大学大学院農学研究科

**株式会社ハイドロテック

要 旨

岐阜県高山市の足洗谷流域を対象にハイドロフォンと濁度計、流速計等を組み合わせたシステムを複数個所に設置し、山地流域全体の土砂収支を把握することで、空間的な土砂動態の違い、降雨分布との対応を把握することを目的とした観測を行なった。その結果、出水時における流砂量の空間的・時間的違いが検知され、定量的に土砂動態を把握することが可能であることが示された。ただし、観測機器の技術的課題など、いくつかの問題点が残されている。今後これらの課題を克服し、山地流域全体を網羅した土砂動態のモニタリング手法を確立していく。

キーワード：ハイドロフォン、掃流砂、土砂動態モニタリング、山地流域

1. はじめに

山地河川における掃流砂・浮遊砂等の土砂の動態を把握することは、土砂災害・洪水災害を防止することはもちろん、山地から海岸へと続く流砂系の総合的管理を実践する上で、欠くことのできない重要な情報を提供する手段である。しかし、これまで提案されている土砂動態計測手法には、1) 装置が大掛かりである、2) メンテナンスに手間がかかる、3) 連続観測が難しい、等の問題点があり、これまでのところ連続して定量的に土砂動態を把握することはできていないというのが現状である。また、近年の降雨観測の進展により、空間的な降雨分布に大きなばらつきがあることがわかってきており、それに合わせてよりきめ細かな土砂動態の把握が求められてきている。

このような背景を鑑み、本研究では近年新たに提案されている、掃流砂量計測装置であるハイドロフォンを用いたモニタリング手法を山地流域に適用することを考えた。ここで、ハイドロフォンとは、河床に設置した金属製パイプに掃流砂が衝突するときに発生する音を、金属パイプ内に設置したマイクロフォンによって検出し、掃流砂量を求めるものである。また、山地流域内の支流をそれぞれモニタリングし、これまで行なわれてきたよりも高密度な計測を行な

い、山地流域全体の土砂収支を把握することで、空間的な土砂動態の違い、降雨分布との対応を把握することを目的とした観測を行なった。

このモニタリング手法が確立すれば、流砂系において、土砂生産が活発な山地流域に適用し、流砂系の総合土砂管理に資する情報を提供することが可能となり、最終的には、土砂災害・洪水災害の軽減へとつながるものと考えられる。

2. ハイドロフォンの原理と既往の研究

ハイドロフォンとは、砂や礫などの粒子が河床に設置した金属パイプに衝突するときの音をパイプ内に設置したマイクロフォンで検知し、掃流砂量を計測するものである（Fig. 1参照）。

日本やスイスにおいて、1980年代よりその開発が始まっており（澤井，2001；Baezinger，1990；Rickenmann，1992），1990年代以降にその実用化に向けた計測技術の向上や、現地への適用実験などが活発に行われるようになってきている（栗原，宮本，1992；水山ら，1996；水山ら，1998；水山ら，2002）。

ハイドロフォンはそもそも、流砂量の絶対値を計測するものではなく、流砂量の大小を相対的に計測する装置であるが、ハイドロフォンの下流に設置したピット掃流砂計測装置によって直接計測した流砂

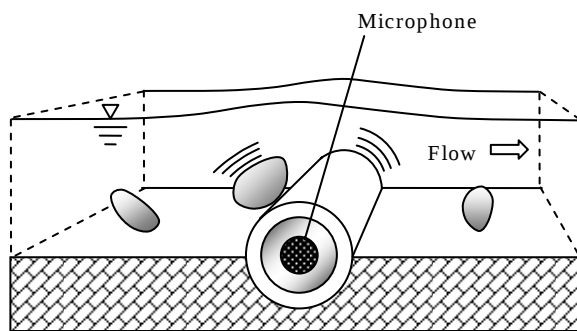


Fig. 1 Schematic figure illustrating method of bed load measurement by hydrophone

量と相関を取ることで、ハイドロフォンによって得られる流砂パルス数から流砂量を定量的に求める手法についても検討が行われている（水山ら，2003；星野ら，2004）。また，ハイドロフォンの弱点と考えられてきた，流砂量が多いにもかかわらずパルス数が一時的に減少，もしくは0に近付くという現象に関して，水路実験による詳細な検討が行われ，これを克服する技術も開発されてきている（小田ら，2008）。

最近では，水理模型実験の流砂量計測装置としてハイドロフォンが利用される研究や（小田ら，2005），実河川に設置され流砂量観測が行なわれるなど（星野ら，2004；中谷ら，2007），ハイドロフォンが実用化され始めている。

3. 観測流域

穂高砂防観測所の観測流域のひとつである足洗谷流域（流域面積 12.6 km^2 ）を対象として観測を行なった。足洗谷流域は，ヒル谷，割谷，白水谷，黒谷の4支流からなっており，それらが合流した後，足洗谷となり，蒲田川に合流している。ここで，ハイドロフォンは，各支流とそれらが合流した後の足洗谷本流の計5ヶ所に設置する計画であるが，現在は白水谷を除く4ヶ所に設置している。流域の全体図とハイドロフォンを設置した位置をFig. 2に示す。

ハイドロフォンは，砂防堰堤や試験水路等，河床が固定されている場所を選んで設置している。それぞれ設置した位置の様子をPhoto 1からPhoto 4に示す。足洗谷のハイドロフォンは，コンクリートの試験流路の下流端に設置され，その直下流にはピット流砂量計が併設されており，ハイドロフォンの出力パルスと流砂量とのキャリブレーションを行うことができる（Photo 1）。黒谷のハイドロフォンは，工事用道路が渓流と交差する地点の洗越し部に設置され，流速計，水位計，濁度計と併設されているため，流

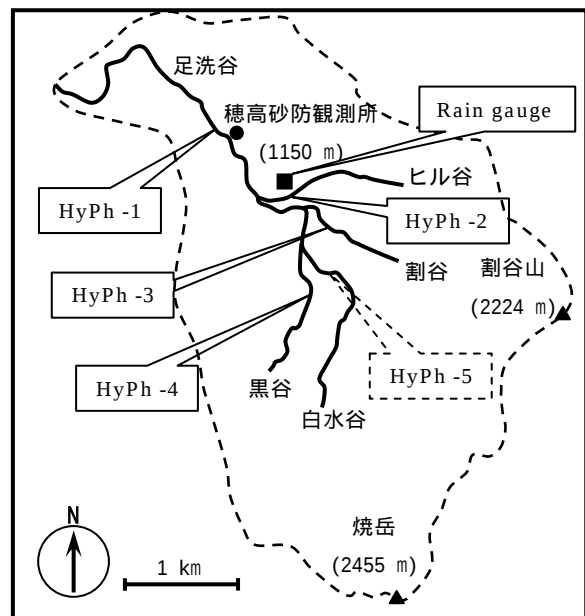


Fig. 2 Ashiarai-dani chatchment area and measurement points



Photo 1 Hydrophone at Ashiaraidani station

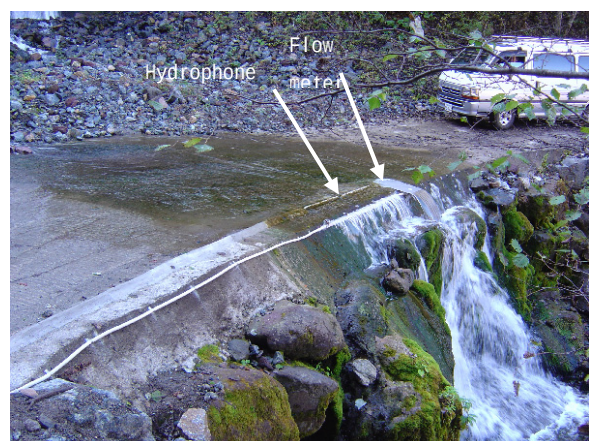


Photo 2 Hydrophone at Kurodani station

量や濁度との相関を取ることが可能である（Photo 2）。割谷のハイドロフォンは，砂防堰堤の水通し部に設



Photo 3 Hydrophone at Warudani station



Photo 4 Hydrophone at Hirudani station

置され、流速計、水位計、濁度計と併設されているため、黒谷と同様にそれらのデータと相関を取ることが可能である（Photo 3）。ヒル谷のハイドロフォンは、試験堰堤の貯水池上流端に設置され、試験堰堤における流量、濁度と相関を取ることが可能である（Photo 4）。足洗谷の支流の残るひとつである白水谷に関しては、現在はハイドロフォンを設置していないが、2008年度以降に設置する予定であり、設置場所の検討を行っている。

4. 観測結果

4.1 観測期間における降雨

2007年6月から2008年3月までに、ヒル谷下流において計測された降雨をFig. 3に示す。梅雨期から秋にかけて断続的にまとまった降雨が観測されているが、各降雨の最大降雨強度は大きくなく、最大でも17 mm/hrである。事実、昨年は大きな降雨イベントはなく、観測流域である足洗谷において、土石流などの大規模な土砂移動現象は観測されていない。ただし、ハイドロフォンは、大きな土砂移動イベントでなく、

むしろ小規模な掃流砂を計測することに向いているため、昨年のような大きな降雨イベントのない年であっても、土砂移動が計測されているものと思われる。

4.2 各観測点における観測結果

Fig. 3に示した降雨の期間と同じ期間に計測された、足洗谷、黒谷、割谷、ヒル谷、各地点での水位、ハイドロフォンパルス、濁度の変化をFig. 4, 5, 6, 7にそれぞれ示す。ただし、足洗谷では技術的な問題のため、濁度が観測されていなかったため、ここでは表示していない。まず、個々の観測地点における観測結果の全体的な傾向について述べる。足洗谷では、2007年8月のデータ収集開始以来、ハイドロフォンパルス、水位共に安定的にデータが得られている。黒谷では、2007年10月のデータ収集開始以来、比較的安定的にデータが得られているが、11月末から12月にかけて欠測期間がある。これは、通信不良によるものと思われる。また、欠測からの回復後は濁度データが不安定な値を示している。割谷では、2007年6月のデータ収集開始以来、ハイドロフォンパルス、

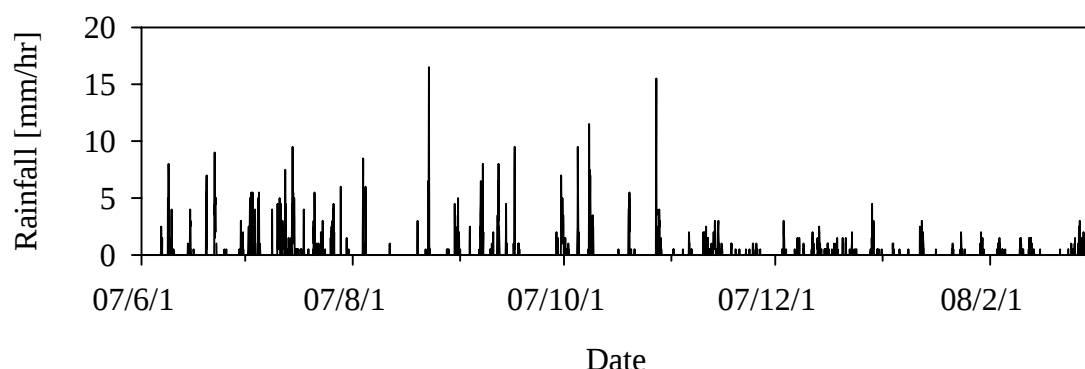


Fig. 3 Observed rainfall at Hirudani station

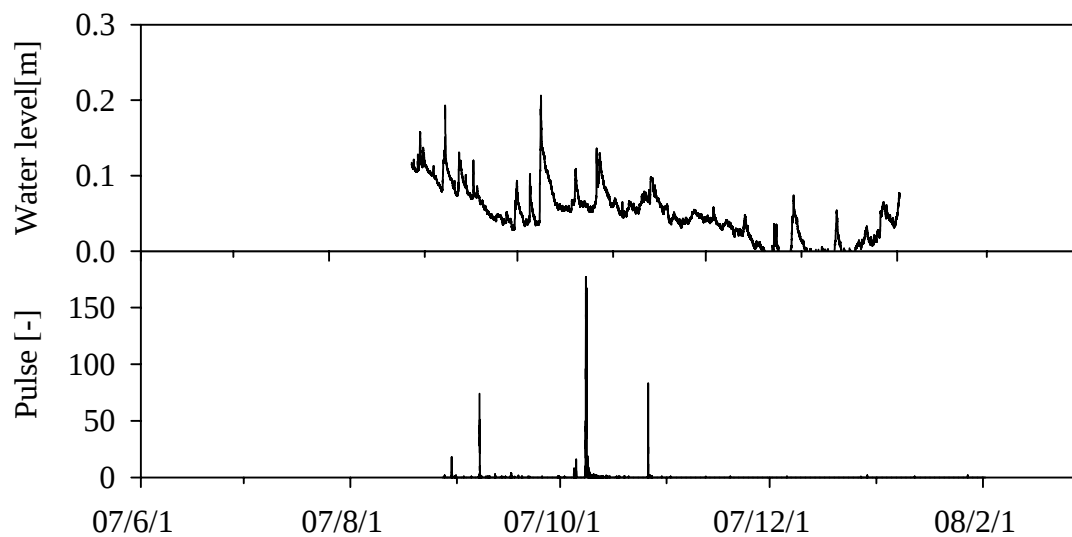


Fig. 4 Observed water level and hydrophone pulse at Ashiaraidani station

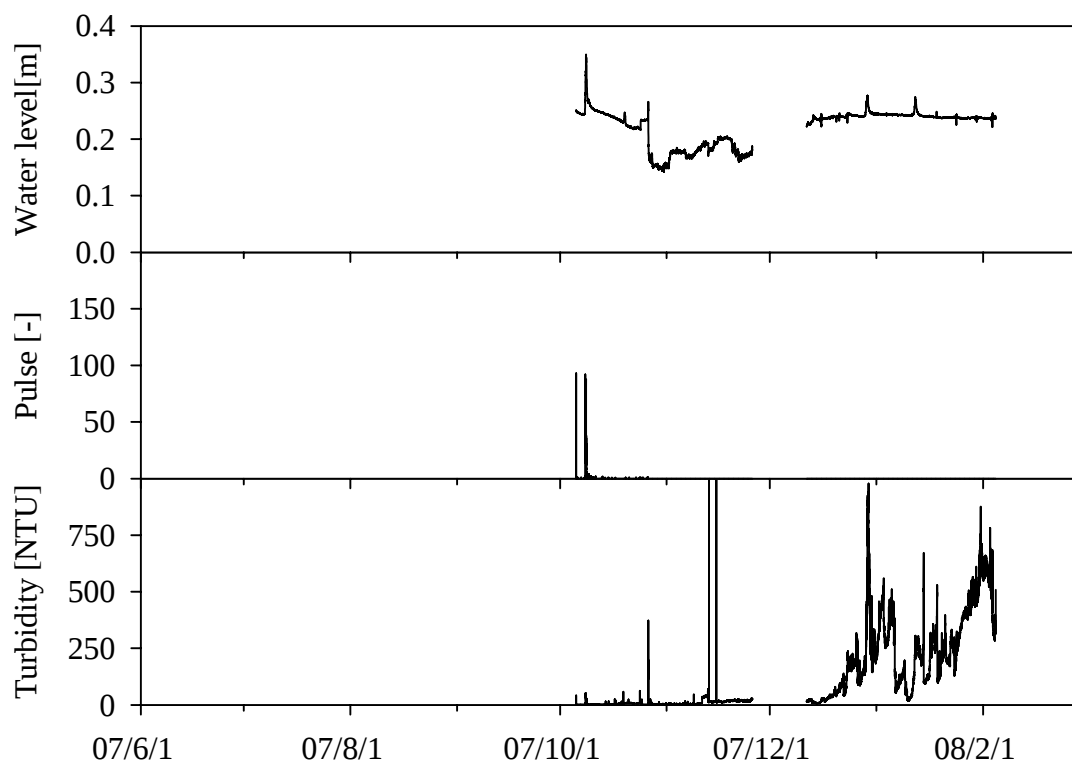


Fig. 5 Observed water level, hydrophone pulse and turbidity at Kurodani station

水位、濁度ともに比較的安定してデータが得られているが、9月末から断続的に短期間の欠測期間がある。これは、通信不良によるものと、電源供給不足（太陽電池パネルを使用）によるものと考えられる。ヒル谷では、2007年以前の観測開始から継続して水位、ハイドロフォンパルス、濁度を計測しており、水位、濁度に関しては、非常に安定的にデータが得られている。しかし、ハイドロフォンパルスに関しては、2007年8月以降常に微小な出力が検出されており、ノ

イズが入った状態が続いている。また、2008年1月以降は、頻繁にパルスが検出されているが、これらの傾向は、他の3地点とは異なるものであり、ハイドロフォンパルスの計測に何らかの不具合が生じているものと考えられる。

比較的安定して、ハイドロフォンパルスの計測ができている、足洗谷、黒谷、割谷の観測結果と、降雨との対応を見てみると、ハイドロフォンパルスが観測されるときは、比較的まとまった降雨が観測さ

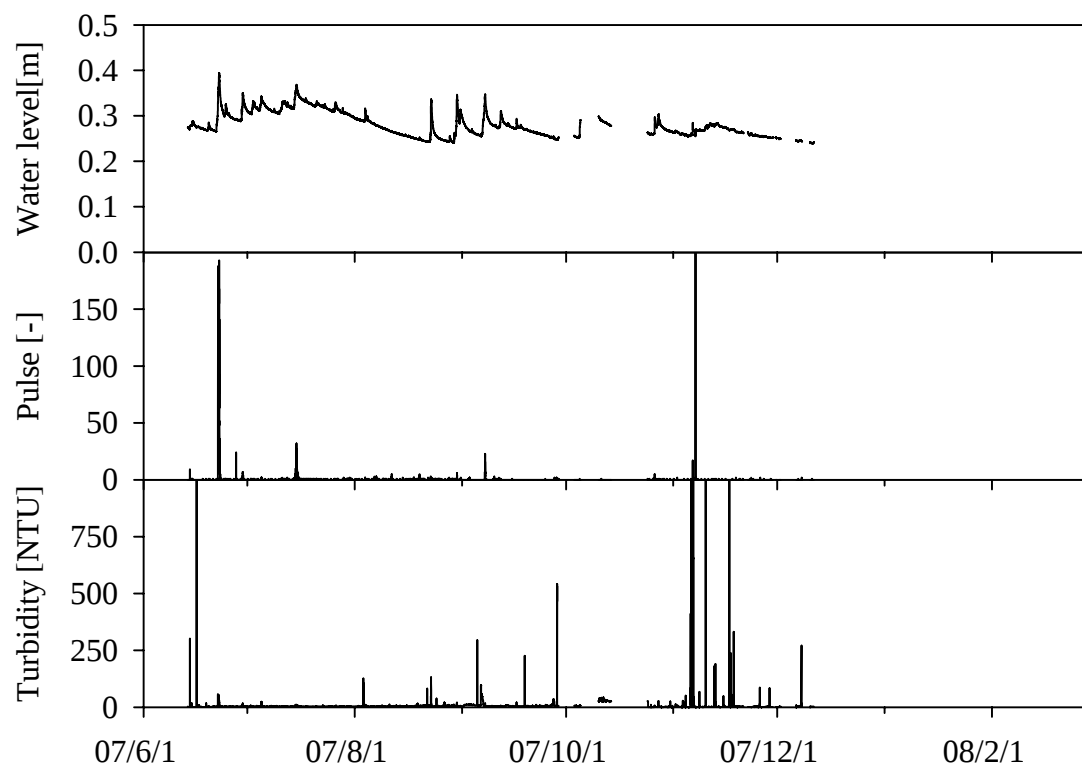


Fig. 6 Observed water level, hydrophone pulse and turbidity at Warudani station

れており、それに伴って水位の上昇も見られる。しかし、同程度もしくはそれ以上の降雨が観測され、水位上昇が起こっていても、ハイドロフォンパルスが検出されていないこともあり、まとまった降雨があれば必ず土砂移動が起こるわけではないことが示されている。これは、山岳地域特有の降雨の空間的なばらつきや、土砂供給現象（斜面崩壊、河岸侵食、河床堆積物の再移動）の時間的な差異によるものと考えられ、特に山地河川の河床には、流砂の供給源となる土砂が均一かつ十分に堆積しているわけではないことが起因しているものと考えられる。ハイドロフォンパルスと濁度変動との対応を見ると（Fig. 5, 6）、ハイドロフォンパルスが検出されているときは、濁度が上昇する傾向が見られるが、ハイドロフォンパルスが検出されていないときでも濁度上昇が検出されることが数多くある。このことから、ハイドロフォンで検知される掃流砂の移動と濁度計によって検知される浮遊砂・ウォッシュロードの移動は、必ずしも同時に起こるわけではないことが示されている。また、割谷では（Fig. 6）、ハイドロフォンパルスが検出されていても、濁度上昇が見られないことが数少ないが観測されている。観測値に問題がないとすると、掃流砂は移動しているが、濁度成分は移動していないということである。流砂の供給源が、斜面崩壊や河岸侵食であるならば、掃流砂成分と合わせて必ず浮遊砂やウォッシュロードといった濁り

成分が含まれているため、このような観測結果とはならない。よって、河床に堆積していた掃流砂成分のみが流量の増加により再移動し、ハイドロフォンパルスとして検出されたものと考えられる。このように、ハイドロフォンと濁度計をあわせた観測システムを用いると、流砂の供給源を推定することも可能になるものと考えられ、流域の土砂動態に関して量的だけでなく質的な検討も行なうことができる有効な手段と考えられる。

4.3 イベント時における詳細結果

観測地点間でのハイドロフォンパルスの出力値を比較し、流砂の空間的な把握を行うため、足洗谷と黒谷の両地点でハイドロフォンパルスが正常に検出されている2007年10月8日前後あわせて3日間のデータを降雨と共にFig. 8に示す。この期間の降雨は10月8日0:00に始まり、5:00から6:00にピークを示し、17:00に一旦止み、その後再び9日1:00から11:00まで続いた。一連の降雨の総降雨量は89 mmであり、比較的まとまった降雨であったが、土砂災害が発生するほどの規模ではない。黒谷、足洗谷における水位上昇が顕著になるのは、降雨ピーク直前の8日4:00頃で、その後上昇を続け12:00から14:00の間に最大値を記録している。黒谷と足洗谷の水位変動はほぼ同じ傾向を示し、時間的な差異も小さい。一方、ハイドロフォンパルスが検知され始めたのは、黒谷が降雨ピーク

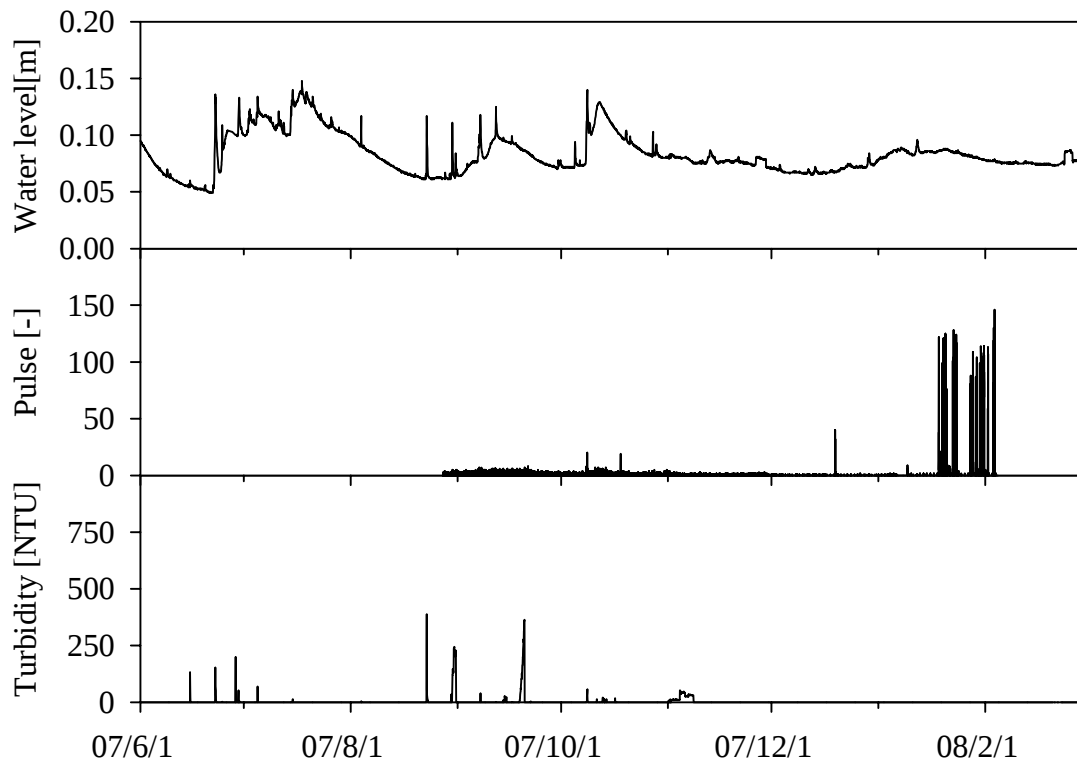


Fig. 7 Observed water level, hydrophone pulse and turbidity at Hirudani station

とほぼ同時8日5:00頃で、足洗谷では少し遅れ6:00頃である。黒谷では、その後パルス数が急増し、降雨ピーク後かつ水位ピーク前の7:00から8:00の間にピークを記録している。一般的に流量ピークと流砂量ピークは時間的に一致せず、流量よりも流砂量の方が早くピークを迎えるということが経験的に知られており、このことと一致している。その後、2度目のパルス数ピークが12:00頃記録されている。一方、足洗谷においては、ハイドロフォンパルスは、黒谷よりも遅れて増加し始めており、ピークは12:00頃に記録されている。その後、2度目のピークは、18:00頃に記録されている。黒谷と足洗谷のハイドロフォンパルスを詳細に比較してみると、変動曲線の形が、非常に似ており、足洗谷の変動曲線は、黒谷のそれを時間的に遅らせかつ伸ばした様な形を呈している。よって、黒谷、足洗谷の2地点で観測されたハイドロフォンパルスは、同一の流砂のまとまりを計測した結果である可能性が高い。このことから推測すると、まず、黒谷上流部のある地点で生産された土砂が、河道に流入し黒谷下流部のハイドロフォン観測地点まで流下し、パルスとして観測された。その後、流下速度が速い成分と遅い成分が徐々に分離されながらさらに流下し、白水谷、割谷、ヒル谷と順次合流した後、足洗谷のハイドロフォン観測地点まで到達し、パルスとして検知されたと考えられる。検出時

間の遅れを見るため、単純に一度目のピークの時間差を計算すると、黒谷と足洗谷の観測地点間で約4.5時間の遅れがあり、2地点間の距離が2.0 km離れていることから、掃流砂の移動速度は、約0.45 km/hrと推定される。

今年度の観測では、異なる複数地点間においてハイドロフォンパルスが正常に検出されているのは、Fig. 8に示した、黒谷と足洗谷における2007年10月8日のデータのみであったが、足洗谷流域の観測網の維持管理を徹底し、観測を継続することで、さらに複雑な土砂動態の解析が可能となるものと期待する。

5. おわりに

ハイドロフォンを用いた流砂量観測システムにより、山地系流域における面的な土砂動態のモニタリングを試みた。その結果、以下に示す、いくつかの知見が得られた。

〔1〕 ハイドロフォン計測上、通信等の技術的問題がない期間において、小規模な流砂現象であっても、確実にパルスが検出されており、対象とした足洗谷のような山地河川においても有効な掃流砂計測装置である。

〔2〕 ハイドロフォンと濁度観測とを組合せること

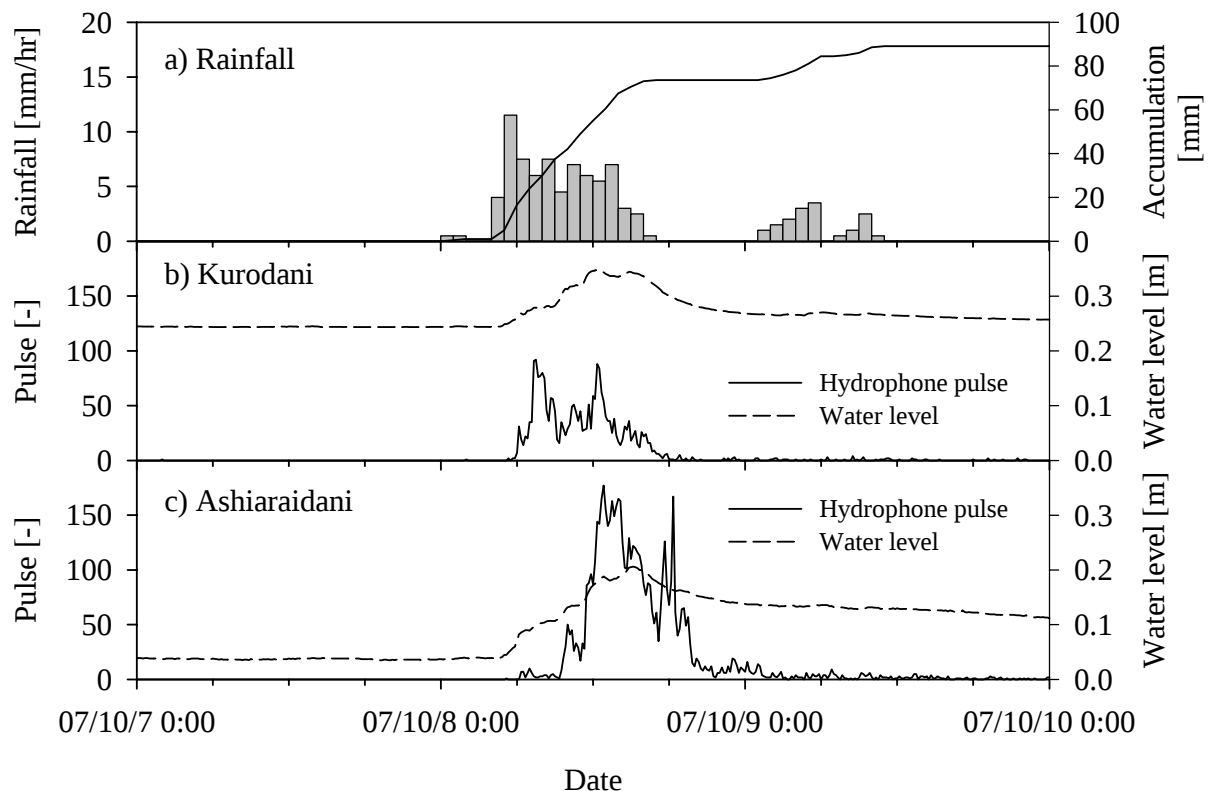


Fig. 8 Comparison of hydrophone pulse and water level changes observed at Kurodani and Ashiaraidani station during a rainfall event on October 8, 2007

によって、掃流砂と浮遊砂、ウォッシュロードといった濁り成分の観測を網羅することができる。また、流砂の供給源が斜面崩壊・河岸侵食などの外部からなのか、河床堆積土砂の再移動のような河川内部からなのかを推定することも可能となると考えられる。[3] 異なる2地点で観測されたハイドロフォンパルスの変動曲線を比較することで、流砂の経路を推定し、土砂が供給された位置を特定することも可能であることが示された。3地点以上の観測結果を比較することで、変動曲線の重ね合わせ等を行い、さらに複雑な土砂動態解析を行うことも可能と考える。

現在のところ、降雨分布と土砂動態との関係に関する検討や、ハイドロフォンパルスから流砂量を求める定量的解析などを実施する段階までは至っていない。今後、ハイドロフォンパルスとピット流砂量計による流砂量との相関を用いて、より定量的な流砂量計測を行う予定である。また、本年度は、足洗谷を対象とした面的な観測を開始した初年度であるため、機器の維持管理や通信上の問題が多数起こり、安定的に全ての地点からデータを得ることができなかった。これらのシステムの問題点を改善し、より有用な流砂量観測システムを構築していく。

謝 辞

本研究の一部は、社団法人近畿建設協会からの研究助成を受けて行った。この場を借りて、謝意を表する。

参考文献

- 小田晃・長谷川祐治・水山高久・宮本邦明・野中理伸(2005):ハイドロフォンによる流砂量計測の水理実験への適用,砂防学会誌,58(2),p.15-25.
- 小田晃・水山高久・Jonathan B. Laronne・野中理伸・松岡美和(2008):ハイドロフォンの特性に関する水路実験,砂防学会誌,60(5),p.66-71.
- 栗原淳一・宮本邦明(1992):音響を利用した流砂量計測装置について,砂防学会誌(新砂防),44(5),p.26-31.
- 澤井健二(2001):流砂系即技術の現状と展望,砂防学会誌,54(2),p.75-84.
- 中谷洋明・鶴田謙次・吉村暢也(2007):手取川上流域でのハイドロフォンを用いた流砂量観測及び解析,砂防学会誌,60(3),p.20-25.
- 水山高久・里深好文(2003):ピット流砂計測装置

- のハイドロフォンのキャリブレーションへの適用，
砂防学会誌，56(3)，p.55-56.
- 水山高久・富田陽子・野中理伸・藤田正治（1998）：
ハイドロフォンによる流砂量の観測（続報），砂防
学会誌，50(6)，p.44-47.
- 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)，p.34-37.
- 水山高久・野中理伸・藤田正治（2002）：常願寺川
津之浦下流砂防堰堤におけるハイドロフォンによ
る流砂観測，砂防学会誌，55(3)，p.56-59.
- 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.

Development of a Sediment Flow Monitoring System in a Mountainous Catchment Area

Daizo TSUTSUMI, Takahisa MIZUYAMA*, Michinomu NONAKA**, Masaharu FUJITA and Masao SHIDA

*Graduate School of Agriculture, Kyoto University

**HydroTech Co.

Synopsis

Hydrophones were installed at several branches of Ashiarai-dani chatchment which has been an investigated subject of Hodaka Sedimentation Observatory, and observations of sediment load were conducted. As a result, the system observed temporal and spatial change of sediment load within the chatchment. The result indicated that the observation system is useful for the total observation of sediment load within a whole chatchment, which is required for the integrated control of a sediment flow system from mountain to river mouth. Farther development of the system and analysis method is expected.

Keywords: hydrophone, bed load, sediment flow monitoring, mountainous stream