

山地流域における音響法を用いた流砂量観測

堤 大三・平澤良輔*・水山高久**・志田正雄・藤田正治

* 国土交通省国土交通省 中部地方整備局 浜松河川国道事務所

** 京都大学大学院農学研究科

要 旨

土砂災害の防止・軽減や山地域から河口にいたる流砂系の総合的な土砂管理を実践するためには、流砂量の把握が不可欠であり、そのためには有効な流砂量観測技術の確立が重要となる。ハイドロフォン流砂量計は、河床に設置した金属パイプにマイクロフォンを内蔵した、掃流砂を計測する装置である。岐阜県高山市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では、観測対象流域である足洗谷の5箇所に掃流砂の総合的な観測を目的としてハイドロフォン流砂量計を設置している。2009年の出水期には、設置した5箇所全てのハイドロフォンで、同じ出水イベントの掃流砂パルスが正常に観測され、流域全体の土砂動態の検討が可能であることが示された。また、単粒径土砂や混合粒径土砂を用いた現地キャリブレーション実験によって、ハイドロフォンパルスと掃流砂量の関係を求め、それを用いてある程度正確に流砂量を算出できることを示した。

キーワード：ハイドロフォン，掃流砂，山地流域，キャリブレーション実験

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、河川要素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。

流砂量計測手法は、大きく直接法と間接法に分けられる。前者においては、土砂を河床から直接採取するため、定量的な計測が可能である。しかしながら、計測機器が大型であることや計測を行うためには多大な労力を必要とするなどの問題がある。一方、後者では、流砂量は間接的な信号に変換されて定量的な計測となるが、連続的な計測が可能なことや、計測に必要な労力が軽減されるなどの利点がある。

間接法の一つとして、ハイドロフォン流砂量計を挙げることができる。ハイドロフォンの計測原理は、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知し、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、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, 1990; Richenmann, 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である足洗谷においても、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)。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。設置された2箇所のハイドロフォンを用いて現地キャリブレーション実験を行い、掃流砂量とハイドロフォンパルスの関係を求めた。これらの関係を、2009年に発生したいくつかの出水イベントに適用した結果、ある程度の精度で流砂量が再現できた。これらの結果から、間接



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

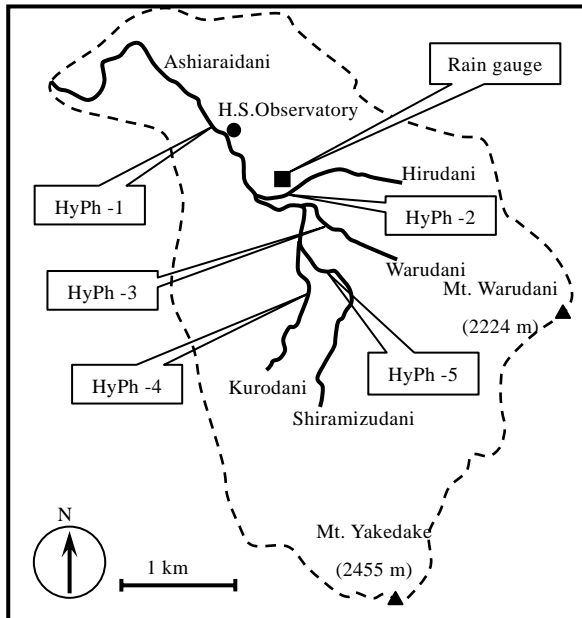


Fig. 2 Map of the Ashiaraidani watershed and location of the hydrophones in the watershed.

法であるハイドロフォン流砂量計を用いて、定量的な流砂量計測が可能であることが示された。

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級飛騨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 km²であり、南東方向から北西方向に向かって流下し、標高1,050 mで蒲田川に合流

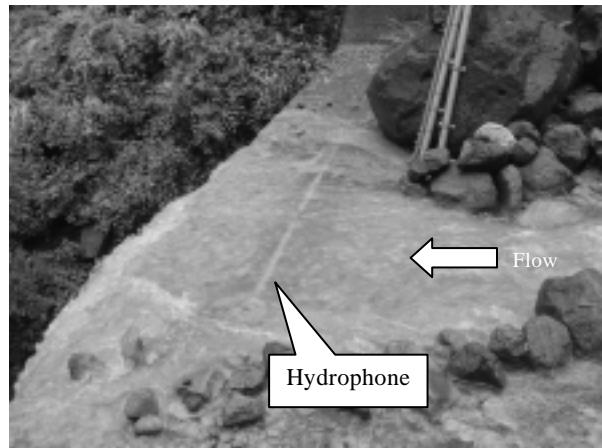


Fig. 3 The hydrophone installed on the dam site of Shiramizudani.

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こ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。

3. 観測されたハイドロフォンパルス

2009年の6月から9月にかけて複数回の降雨イベントが起こり、それぞれのイベントごとにハイドロフォンパルスが観測された。6月22日から26日にかけて、5箇所全てのハイドロフォンにおいて観測されたパルスを降雨強度と水位の変動とともにFig. 4に示す。この降雨イベントにおける積算降雨量は73 mmで、最大降雨強度は21 mm/hrであり、近年、足洗谷にお

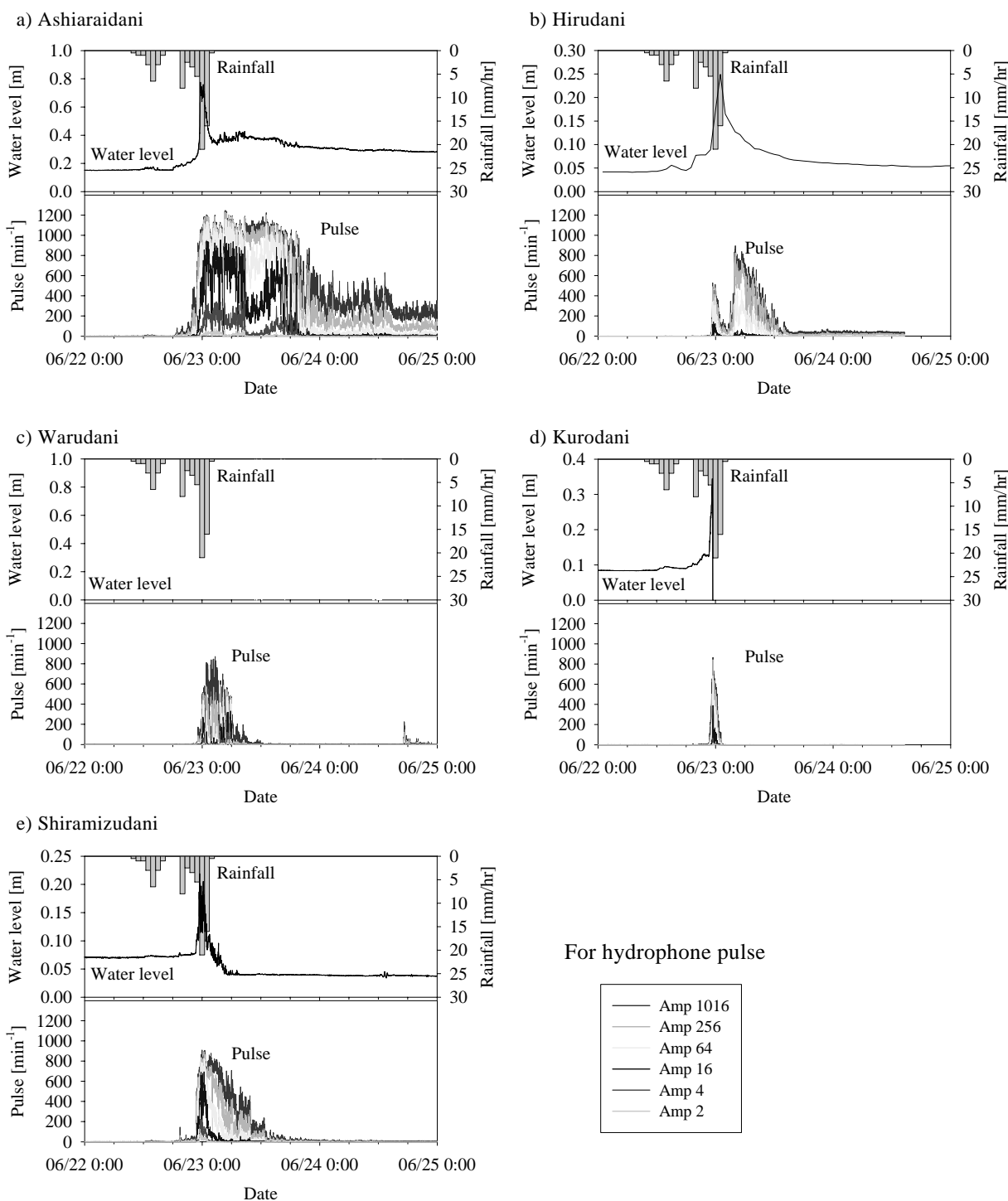


Fig. 4 Temporal changes of the observed rainfall intensity, water level and hydrophone pulses for each observation sites; a) Ashiaraidani, b) Hirudani, c) Warudani, d) Kurodani and e) Shiramizudani, from 22 to 25 of June, 2009

いては年に1回程度起こるような中程度の降雨イベントであった。足洗谷本流と4支川のハイドロフォンパルスは、降雨ピークと水位変動のピークの直後から検出され始め、すぐに最大値に達した後、降雨の停止とともに徐々に減少していく共通した傾向が見られる。しかし、詳細に比較すると、地点ごとに降雨に対してハイドロフォンパルスが異なる応答を見

せていることが分かる。5ヶ所のハイドロフォンの中では、足洗谷本川におけるハイドロフォンにおいて、最多のパルス数が検出されている。4支川の中では、白水谷のハイドロフォンにおいて最多のパルスが検出されている。黒谷のハイドロフォンにおいては、極端にパルス数が少ないが、これはハイドロフォンセンサーと水位計が降雨ピークの直後に発生したと

考えられる土石流によって破壊されたことが原因である。ハイドロフォンパルス検出期間について比較すると、足洗谷本川でのハイドロフォンパルスが最長であり、降雨停止後に2日間以上もパルスが検出されている。

ハイドロフォンパルスの記録においては、検出されたパルスを6段階の増幅率に拡大し、一定の閾値をそれぞれの増幅率において越えたパルス数を記録している。そのため、増幅率を小さく設定した検出パルスは、大きな衝突エネルギーを持った礫のみが検出されており、逆に増幅率を大きく設定した検出パルスは、小さな衝突エネルギーをもった小径土砂をも検出している。この増幅率に注目して5ヶ所のハイドロフォンパルスの記録を比較すると、足洗谷と白水谷では、より小さな増幅率でのパルスも検出されているが、ヒル谷では、より大きな増幅率のパルスしか検出されていない。この結果は、足洗谷と白水谷では、より大きな径の礫が流下し、ヒル谷では、小径の土砂のみが流下していたものと考えられることができる。これらの増幅率と検出パルス数の傾向から定量的に粒径を予測することができれば、足洗谷観測点に流下した大粒径の土砂がどの支流に起因しているかを知ることも可能となる。

2009年のその他の降雨イベントにおいても、ここで示したようなハイドロフォンパルスが計測されており、ハイドロフォン流砂量計が、流域全体の土砂動態を定性的に把握することに非常に有効な手法であることが示されている。

4. ハイドロフォンパルスと掃流砂量との関係の現地キャリブレーション実験

ハイドロフォンパルスの検出による流砂モニタリング法は、山地河川において土砂動態を把握することに有効な手法であることが示されたが、これは定性的な情報に過ぎない。ハイドロフォンパルスから定量的な流砂量を得るための方法として、設置されたハイドロフォンに粒径と量の既知である土砂を供給してそのときのハイドロフォンパルスを検出し、両者の関係を求めるキャリブレーション実験が有効である。現地キャリブレーション実験を白水谷と足洗谷のハイドロフォンを用いて実施した。実験には、数種類の単粒径土砂とそれらを混合した混合粒径土砂を用いた。

4.1 単粒径土砂

3種類の単粒径土砂を用意し、キャリブレーション実験に用いた。平均粒径はそれぞれ10.6, 16.7, 24.8 mmである。これらの単粒径粒子は、ハイドロフォン

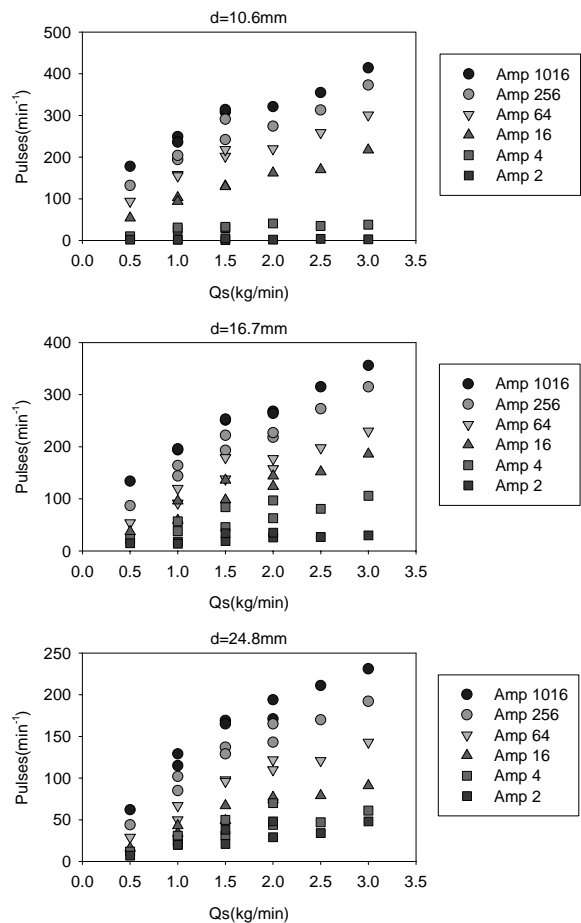


Fig. 5 Relationship between sediment load and hydrophone pulses obtained by calibration experiments

上流約1 mの地点から人力によって供給され、そのときのハイドロフォンパルスが記録された。土砂の供給においては、流砂量が0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 kg/minとなるようにその速度を調整した。

足洗谷のハイドロフォンにおけるキャリブレーション実験の結果をFig. 5に示す。それぞれの粒径において、流砂量の増加に伴いパルス数が増加し、また検出パルスの増幅率の増加と共に全体的に多数のパルスが検出される結果となっている。流砂量とパルス数は、ほぼ比例の関係を示している。等しい流砂量で比較した場合、粒径が小さいほど検出されるパルス数が多い傾向が見られる。これは、流砂量が同じであれば、粒径が小さい程、個数が多いためである。小粒径の場合は、小さな増幅率では、検出されない場合がほとんどである。これらの流砂量対ハイドロフォンパルス関係を用いれば、単粒径の流砂に対して定量的に流砂量を求めることは可能である。

全体の流砂に対してどの程度の土砂がハイドロフォンによって検出されているかを知るため、ハイドロフォンパルスを実際の土砂個数で除した検出率を、足洗谷におけるハイドロフォンキャリブレーション

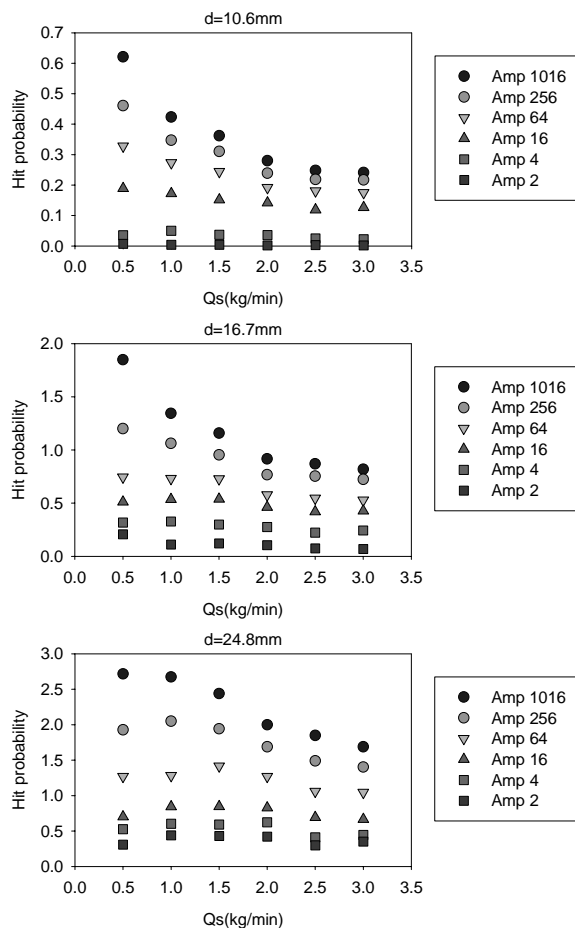


Fig. 6 Relationship between sediment load and hitting probability on the hydrophone

実験の結果から算出し、Fig. 6に示す。この結果によると、大きな増幅率の場合は、流砂量の増加に伴い検出率が減少していく。これは、流砂量が多いと土砂粒子数が多く、ハイドロフォンに衝突する音が飽和状態になり、個々のパルスを分離して検出することできなくなるため、検出パルス数が減少するという理由によるものと考えられる。しかし、中程度の増幅率であれば、流砂量が増加したとしても検出率はほぼ一定であり、これは、どのサイズの粒径でも同様な傾向を示す。このことから、流砂量の多く土砂粒子数が多い場合に発生するパルス飽和の問題を回避するためには、中程度の増幅率での流砂量対ハイドロフォンパルス関係を用いて流砂量の定量化を行うことが合理的である。

4.2 混合粒径土砂

一般的に、自然河川を流下する土砂は、異なる粒径の混合砂であり、単一の粒径である場合は少ない。そのため、前節で示したような単粒径の土砂を用いた流砂量とハイドロフォンパルスの関係では、足洗谷流域における流砂量を求めることはできない。混

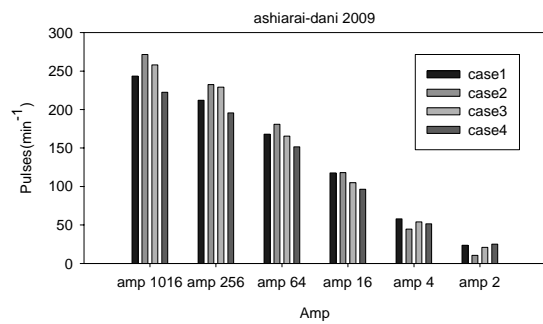


Fig. 7 Outputs of hydrophone pulse for mixed sized sediment (from Case 1 to 4) obtained by the field experiments.

合砂の流砂量を計測できるように、足洗谷と白水谷において混合砂を用いた現地キャリブレーション実験を実施した。用いた混合砂は、3種類の単粒径の土砂を混合したもので、それぞれの粒径は10.6, 16.7, 24.8 mmである。4つの異なる混合比で混合砂を調整し、それぞれCase 1では1:1:1, Case 2では2:1:1, Case 3では1:2:1 Case 4では1:1:2とした。混合砂を用いたキャリブレーション実験では、流砂量を1.5 kg/minとした。実験の結果をFig. 7に示す。この結果から、全てのケースにおいて流砂量は一定であるにもかかわらず、検出されたハイドロフォンパルスは異なる応答を示している。平均的な粒径が小さなCase 2の場合、高増幅率での検出パルス数が多く、逆に平均的な粒径が大きなCase 4の場合、低増幅率での検出パルス数が増える傾向が見られる。この傾向は、単粒径のキャリブレーション実験の結果とも整合するものである。

5. 掃流砂量計算結果

キャリブレーション実験の結果から、各増幅率において、異なる粒径によるハイドロフォンパルスへの寄与を足し合わせたものが、全体の検出パルスになると考えることができる。このことから、式(1)のように、各増幅率における検出パルスを定義する。

$$P(a) = \sum_{i=1}^k R_i(a) N_i \quad (1)$$

ここで、 a はハイドロフォンの増幅率、 k は土砂の粒径界数、 $P(a)$ は増幅率 a のときの検出ハイドロフォンパルス、 $R_i(a)$ は粒径界 i の土砂粒子が増幅率 a のときのハイドロフォンに検出される検出率、 N_i は粒径界 i の土砂粒子の実際の粒子個数である。式(1)に異なる増幅率を適応して連立し、全ての粒径界 i に対

して N_i を求めるためには、 k 個の式が必要となる。ここで用いているハイドロフォンの増幅率は6段階であることから、土砂粒子の粒径は最大で6種類まで分割することができる。

式(1)を解くために必要な、ハイドロフォンパルスの検出率は、Fig. 6に示すキャリブレーション実験から得られており、その値をTable 1に粒子個数 N と共に示す。上記、3種類の単粒径土砂の混合土砂を用いた実験の4ケースについて、3種類の増幅率についての連立式を解き掃流砂量と混合比を求め、Fig. 8に示した。全てのケースについて、掃流砂量は精度良く計算されている。Case 4においては、中粒径の土砂が計算されていない。しかし、全体的に見ると、混合比率もそれなりに良く計算されている。

6月22日から26日に起こった降雨出水イベント (Fig. 4参照) に対して、粒度分布が実験で用いた混合土砂と同様のものと仮定してこの計算手法を適用して掃流砂量を計算した。算出された総流砂量の時間変化をFig. 9に示す。この計算結果を実際の流砂量と比較してハイドロフォンパルスから計算される流砂量の精度検証を行う必要があり、そのような検証はまだ十分に行っていないが、ハイドロフォンパルスから流砂量を算出できるということが示されている。

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、2009年にいくつかの降雨出水イベント中のパルスが観測された。また、掃流砂量とハイドロフォンパルスの関係を求めるための現地キャリブレーション実験も実施された。ハイドロフォンパルスの観測と現地シミュレーション実験の結果から、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 山地河川において、土砂動態を定性的に把握するためにはハイドロフォン流砂量計は有効な手段である。
- 2) 現地キャリブレーション実験によって求められた掃流砂量とハイドロフォンパルスの関係は、ハイドロフォンパルスから流砂量を定量的に求める手段として有効である。
- 3) 山地河川において、流下する土砂の粒度分布を適切な粒経界に分類することができれば、ハイドロフォン流砂量計による定量的な流砂量観測が可能である。

Table 1 Parameters for the equation obtaining the bed load from the hydrophone pulses.

Amplification rate	Sediment size class [mm]		
	10.6	16.7	24.8
256	0.13	0.60	1.50
64	0.011	0.23	0.73
16	0.00	0.0042	0.16
N [kg^{-1}]	573	145	45.6

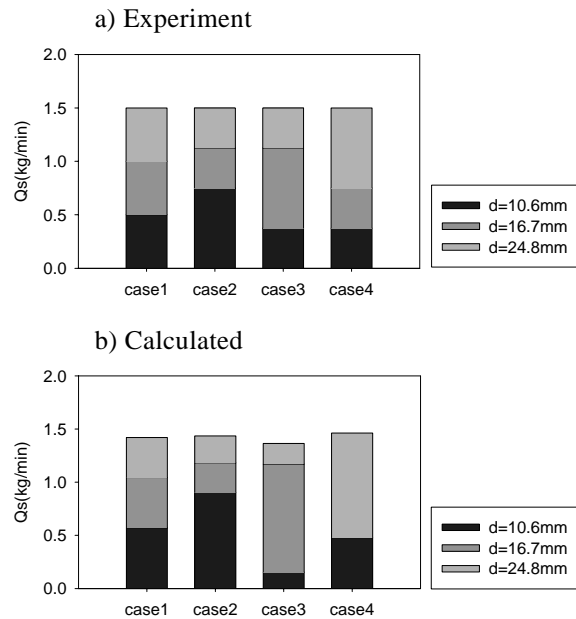


Fig. 8 Size classification of sediment load using hydrophone pulse; a) sediment ratio used in the experiment, b) calculated result

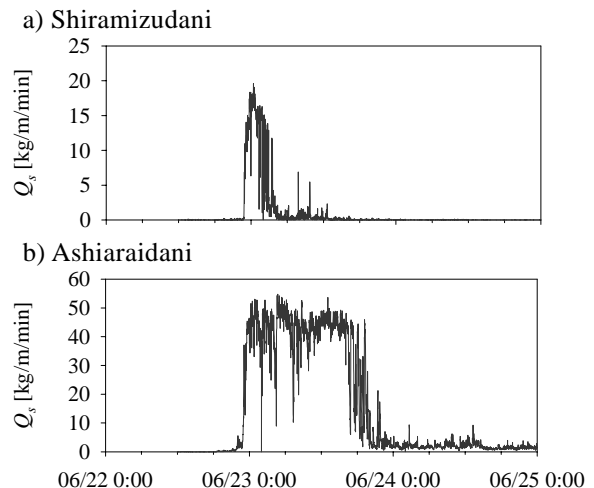


Fig. 9 Calculated bed load from 22 to 25 of June, 2009 for a) Shiramizudani and b) Ashiaraidani

以上の様に、ハイドロフォン流砂量計は、山地河川での流砂量観測に有効な手法であることが示され

たが、その一方で、土石流などの大規模な土砂移動現象が起こった場合にセンサー部が破壊されてしまう恐れがあり、山地河川での耐久性に問題がある。そのため、ハイドロフォンを用いた観測においてはその維持管理に労力を必要とする場合がある。さらに定量的な流砂量観測のためには、流砂量対ハイドロフォンパルスとの関係式を発展させて、実際の河川内に存在する土砂粒子の粒度分布を適切に表現する混合粒径を仮定する必要がある。

謝 辞

本研究は、その一部を砂防・地すべり技術センター研究開発助成を受けて実施した。また、本研究を推進するにあたり、株式会社ハイドロテックの野中理伸氏には多大な協力を頂いた。ここに謝意を表します。

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),p.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.
- 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.

Bed Load Observation in a Mountainous Watershed by Hydrophone Equipments

Daizo TSUTSUMI, Ryosuke HIRASAWA*, Takahisa MIZUYAMA**, Masao SHIDA and Masaharu FUJITA

* Chubu Regional Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

** Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Synopsis

In mountainous watershed, because the amount of sediment deposits on riverbed is limited and sediment supply is mainly controlled by sediment production, sediment load cannot be calculated theoretically in relation with water discharge. Therefore, it is important to measure sediment load in aspects of mitigating sediment related disasters and integrated sediment control for total sediment transport system from mountain to river mouth. The hydrophone equipments, which measures bed load by detecting hitting sound of sediments on the sensor in riverbed, are installed in five locations in the Ashiaraidani watershed, which is a mountainous stream located in northeast district of Gifu prefecture, Japan. Series of pulses of sediment are observed by every hydrophone simultaneously during several storm events in 2009. Calibration experiments are conducted to obtain a relationship between hydrophone pulses and sediment load consist of several sediment size, and the sediment loads are appropriately calculated for an event by using the relationship.

Keywords: hydrophone, bed-load observation, mountainous stream, calibration experiment