

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏名</b> (ふりがな)	<b>所属</b>	<b>役職</b>	
	堤大三 (つつみだいぞう)	三重大学	教授	
<b>②技術研究 開発テーマ</b>	名称	奥飛騨における大規模土砂災害対策に資する土砂動態把握手法の高度化		
<b>③研究経費</b> (単位: 万円)	平成 年度	平成 年度	平成 年度	総 合 計
	※端数切り捨て。 147万円	168万円	185万円	500万円
<b>④研究者氏名</b>	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
<b>氏名</b>	<b>所属機関・役職</b> (※平成 年3月31日現在)			
宮田秀介	京都大学防災研究所・助教			
藤田正治	京都大学防災研究所・教授			
<b>⑤研究の目的・目標</b>	(様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<b>(背景・課題)</b> 土砂災害の防止・軽減のためには、砂防河川流域における土砂生産・流出を定量的に把握することが必要であるが、既存の流砂量式によって計算することは困難であるため、日本においては過去 40 年、音響法による間接計測手法の開発が進められ、流砂量の計測が行われてきた。申請者らもこれまで 15 年間、活火山焼岳を源流とし土砂流出の著しい足洗谷流域においてハイドロフォンの開発を進めてきたところであるが、流砂量が多い条件下で検出パルスが飽和する問題や、パイプに衝突せずに流下する土砂粒子を検出できない課題が残されている。				
<b>(目的)</b> 上記課題を克服するため、新たな計測手法を用い、土砂流出の著しい砂防河川における流砂量間接計測手法の高度化を図り、年間を通した流砂量を実用的に計測し把握することを目的とする。				
<b>(調査・研究内容及び成果)</b> 高原川流域の支流である足洗谷のコンクリート水路において、ハイドロフォンを横断方向に隙間なく複数設置する。さらに水路の左右岸の垂直壁にもハイドロフォンを設置し、それらを用いてパルスを連続計測する。同時に、水路下流端に設置したスロットサンプラーによって掃流砂量を直接計測し、それらの相関から掃流砂量を獲得する。				
<b>(研究成果の砂防行政への反映)</b> 計測された流砂量データは、奥飛騨地域の土砂流出特性の把握、焼岳火山流域における土砂動態モデルシミュレーションの検証に用いる。また将来、焼岳噴火や地震、豪雨による大規模土砂災害発生時において、土砂流出特性変化を解析し、迅速かつ適切な対策実施に役立てるべく、基礎データとして継続的に蓄積する。				

## ⑥研究成果

パイプハイドロフォンで計測される音響波形の増幅率を  $A_k$  ( $k=1,2,\dots,n$ ) とする。ここで、下付き文字  $k$  は、増幅率のレベルを表し、最小増幅率で 1 に、最大増幅率で  $n$  に対応する。そして、それらの増幅率において検出されたパルス数をそれぞれ  $P_{A_k}$  とする。また、形式的に  $P_{A_0} = 0$  とする。さらに、増幅率  $A_{k-1}$ ,  $A_k$  の場合に検知される粒径範囲をそれぞれ  $d_{A_{k-1}}$ ,  $d_{A_k}$ 、以上とする。ここでそれぞれのパルス数の差分  $P_k$  をとると、

$$P_k = P_{A_k} - P_{A_{k-1}} \quad (1)$$

で表される。これにより算出された  $P_k$  は、理想的に粒径  $d_k \leq d \leq d_{k-1}$  の範囲の砂礫の衝突により得られたパルス数であると考えられる。衝突速度の影響を無視すれば、隣り合う増幅率の差分をとることにより、対象粒径界を限定することができると考えられる。

このパルスの差分  $P_k$  を用いて、流砂量を表すと、

$$W = \frac{C}{\alpha} \sum_{k=1}^n \beta_k \frac{f_k(N_r) \times P_k \times w_k}{\gamma_k} \quad (2)$$

となる。ここで、 $w_k$  : 粒径界  $k$  の代表粒径  $d_k$  の砂礫重量、 $f_k(N_r)$  : パルスの飽和を考慮したハイドロフォンへの砂礫の実衝突回数  $N_r$  に対する検出パルス数の検出率、 $C$  : 各粒径界の流砂量を総和した量の補正係数、 $\alpha$  : 流砂の粒度分布に対する検出限界以上の粒径界の比率、 $\beta_k$  : 各粒径界における流砂量の補正係数、 $\gamma_k$  : 粒径界  $k$  の粒子のハイドロフォンへの衝突率である。 $\gamma_k$  は、Sklar and Dietrich のモデルにより導かれたサルテーション運動の実験式より算出する。実験式から、流砂のサルテーション軌跡を求めることができるが、ここでは簡単のためサルテーションの軌道を直線近似することで砂礫の衝突率  $\gamma_k$  を

$$\gamma_k = \begin{cases} \frac{D_h}{H_s}, & D_h < H_s \\ 1, & H_s \geq D_h \end{cases} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 $H_s$  : 砂礫のサルテーション高さ、 $D_h$  : ハイドロフォンの検知高さである。 $f_k(N_r)$  に関しては、パルスの飽和が起こらない増幅率を用いることで  $f_k(N_r) = 1$  とすることができる。 $\alpha$  は、実測した掃流砂の粒度分布と、用いる増幅率の最小値に対応する検出下限値となる土砂粒子の粒径から設定することができる。 $C$ ,  $\beta_k$  は、式 (2) で計算した流砂量と、スロットサンプラーで実測した流砂量とから求まる MAE (差分の絶対値の平均) が最小となるようにチューニングすることで算出した。

このように、すべてのパラメータが決定されると、各粒径界の流砂量  $W_k$  は、

$$W_k = C \times \beta_k \frac{f_k(N_r) \times P_k \times w_k}{\gamma_k} \quad (2)$$

と計算されることから、掃流砂量だけでなく、その時の粒度分布を求めることが可能となる。決定した補正係数を表-1, 2に示す。

表-1 補正係数

Parameters	Value
$C$	1.13
$\alpha$	0.21

表-2 算出された補正係数  $\beta_k$

Amplification	$\beta_k$
64	1.49
32	1.08
26	0.82
8	0.58
4	0.50
2	0.63

観測および解析結果として、2017年11月23日にピットから採取し、ふるいにかけて土砂が堆積したと考えられる2017年9月22-23日の降雨イベントに注目する。この期間に計算された流砂量 (青) とピット流砂観測装置で計測された流砂量 (橙) を比較し、図-1に示す。全体的

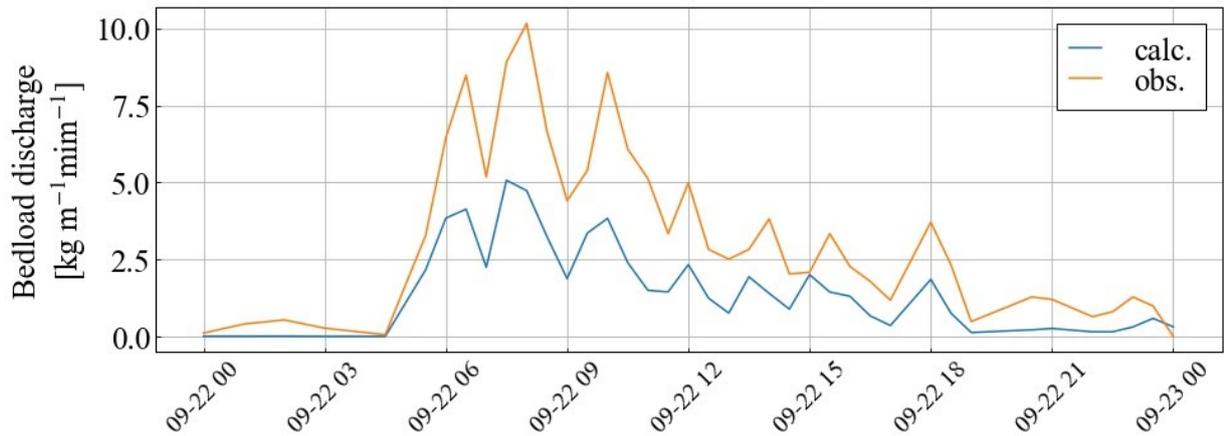


図-1 算出された流砂量と計測された流砂量の散布図

に算出された流砂量は5割程度過小評価されていることが分かる。ここで、縦軸に算出された流砂量を、横軸にピット流砂観測装置で計測された流砂量をとった散布図を**エラー！参照元が見つかりません**。に示す。また、最小二乗法を用いて算出した相関直線を赤線で示す。この際、相関直線は原点を通るよう切片を0としている。この直線に対する決定係数 $R^2$ は0.92と高い値を示しているが、相関直線の傾きが0.48と算出された。つまり、線形的な相関関係は強いものの、全体として半分程度過小評価しており、精度良く流砂量が算出できていない。ここで、残差(計算値-計測値)の評価をするため、縦軸に残差を、横軸にピット流砂観測装置で計測された流砂量をとった散布図を**エラー！参照元が見つかりません**。に示す。この図から、流砂量と残差には線形的な相関がみられるが、これはハイドロフォンで検出可能な流砂の割合 $\alpha$ が、この期間の降雨イベントと大きく異なったことによるものであると考えられる。この理由を裏付けるデータとして、2017年11月23日のふるい結果(橙)と、式(2)により算出された粒径別流砂量により算出された粒度分布(青)の比較を**エラー！参照元が見つかりません**。左に示す。今回用いた増幅率では対象粒径の下限値が8.5mmであることから $\alpha = 0.21$ と決定されたが、ふるい結果から算出された値は $\alpha = 0.05$ であった。つまり、式(2)において、 $\alpha$ の値を高く見積もったため、全体の流砂量が小さく算出されたと考えられる。しかし、この誤差を補正する意味合いで、単純に算出された流砂量を4倍すると今度は流砂量を過大評価しすぎてしまう。これは、補正係数 $C$ 、 $\beta_n$ が、このような想定した定数との誤差が大きいデータに対してもある程度良くフィッティングするように算出されたからであると考えられる。ここで、 $\alpha$ の値をふるい結果に対応させて粒度分布を算出したものを**エラー！参照元が見つかりません**。右に示す。 $\alpha$ の値をふるい結果に対応させるとふるい結果とほぼ一致する結果となった。これは、本手法を用いることにより、観測された各粒径界の流砂量の比は精度よく算出されているということを意味する。

次に、2018年4月28日にふるいにかけた土砂が堆積したと考えられる2018年4月15-16日の降雨イベントに注目する。この期間に算出された流砂量(青)とピット流砂観測装置で計測された流砂量(橙)を比較し、**エラー！参照元が見つかりません**。に示す。**エラー！参照元が見つかりません**。の結果と異なり、全体的に算出された流砂量と計測された流砂量は概ね精度よく一致していることが分かる。ここで、縦軸に算出された流砂量を、横軸にピット流砂観測装置で計測された流砂量をとった散布図を**エラー！参照元が見つかりません**。に示す。また、最小二乗法を用いて算出した相関直線を赤線で示す。この際、相関直線は原点を通るよう切片を0としている。この直線の相関直線の傾きが1.08と算出された。また、計算値とピット流砂量の決定係数 $R^2$ も0.93と算出され、この対象期間において精度よく流砂量が算出できたことを意味している。さらに、2018年4月28日のふるい結果(橙)と、式(2)により算出された粒径別流砂量により算出された粒度分布(青)の比較を**エラー！参照元が見つかりません**。上段に示す。ここから、粒度分布も比較的精度良く算出できていることが分かる。これは、 $\alpha = 0.21$ と決定されているが、対象期間のふるい結果は $\alpha = 0.27$ と近い値であったことから、**エラー！参照元が見つかりません**。-4左とは違い、粒度分布が一致したものと考えられる。また、これが**エラー！参照元が見つかりません**。に示したように流砂量が精度良く算出された理由にもなっていると考えられる。ここで、先ほどと同様に、 $\alpha$ の値をふるい結果に対応させて粒度分布を算出すると**図-7**下段となり、よりふるい結果と近い粒度分布が算出された。

これらの比較・考察から、対象とした期間において、全体の粒度分布の精度は、実際のイベントにおける $\alpha$ の割合が設定した値(今回は0.21)に近いかどうか依存するが、観測され

た各粒径界の流砂量の比は精度よく算出されることが結論付けられる。

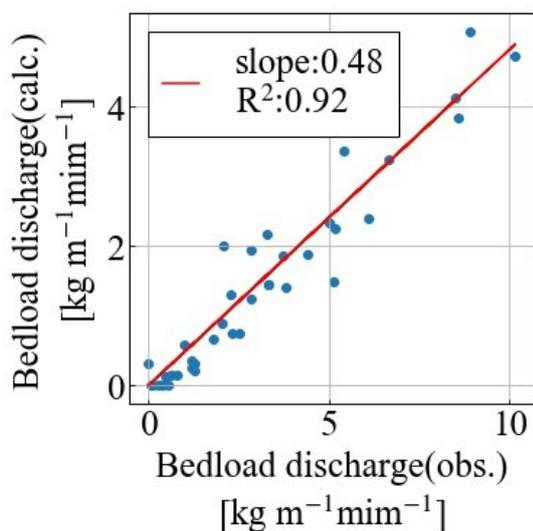


図-2 算出された流砂量と計測された流砂量の散布図 (2017年9月22日0時から9月23日0時)

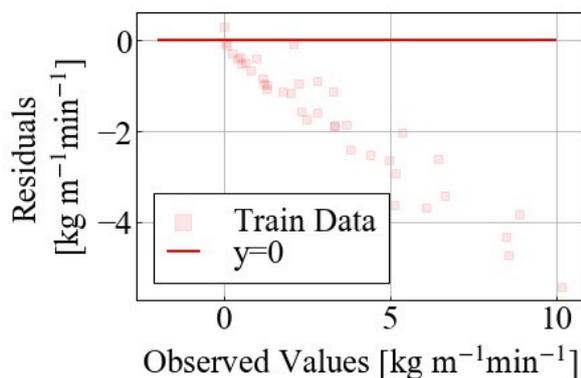


図-3 残差 (縦軸) とピット流砂量の散布図 (2017年9月22日0時から9月23日0時)

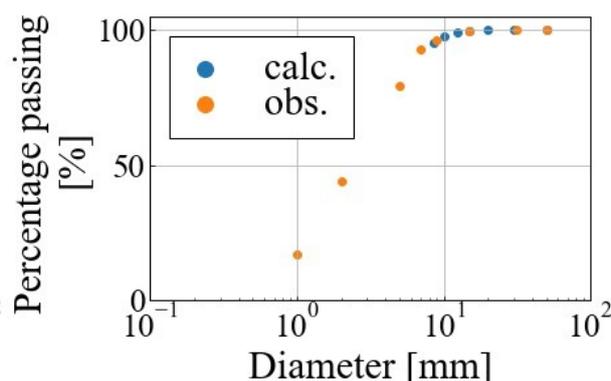
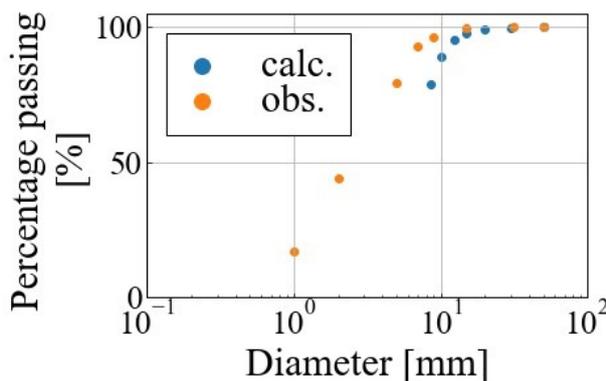


図-4 左：ふるい結果と算出された粒度分布の比較，右：ふるい結果に $\alpha$ を一致させた時の粒度分布 (2017年9月22日0時から9月23日0時)

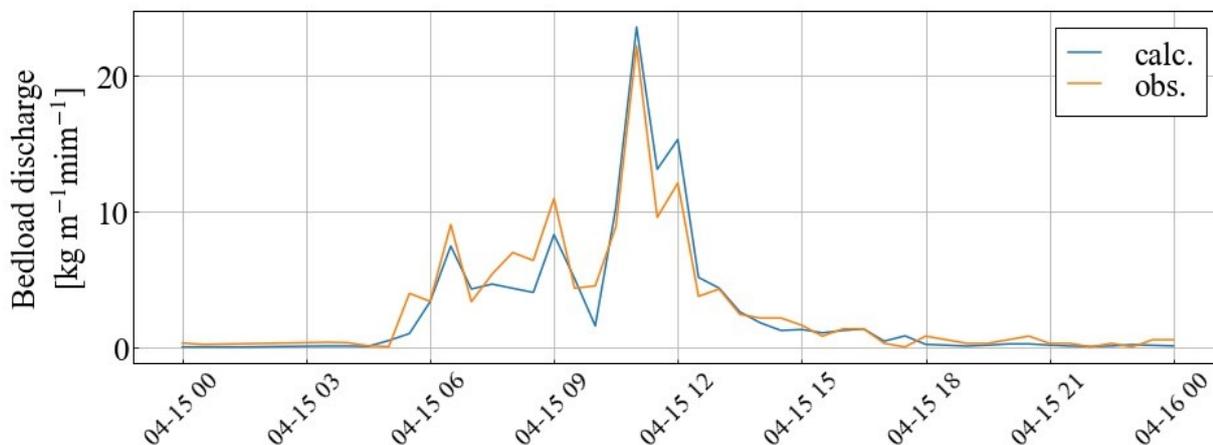


図-5 算出された流砂量と計測された流砂量との比較 (2018年4月15日0時から4月16日0時)

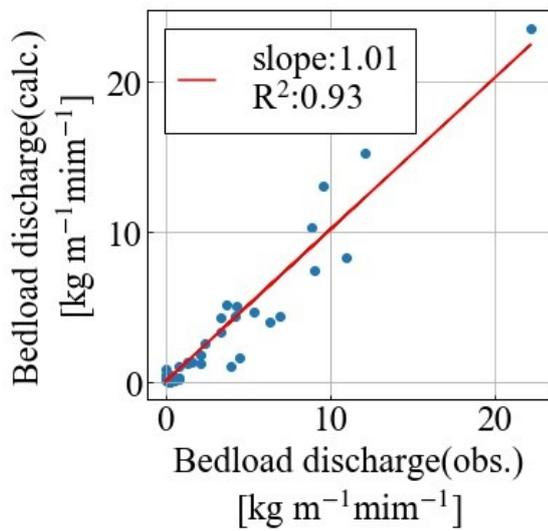


図-6 算出された流砂量と計測された流砂量の散布図 (2017年9月22日0時から9月23日0時)

足洗谷水路横断方向に5本設置されたハイドロフォンを対象に、2019年1月1日から2019年8月29日の間に記録されたデータから、年間の流砂量を求めた。粒径別に分類した積算掃流砂量の横断分布を図-16に示す。図から明らかなように、掃流砂量は左岸側に偏っていることがわかる。また、粒径に関しても偏りが見られ、大粒径の掃流砂ほどより左岸に偏って流れていることがわかる。

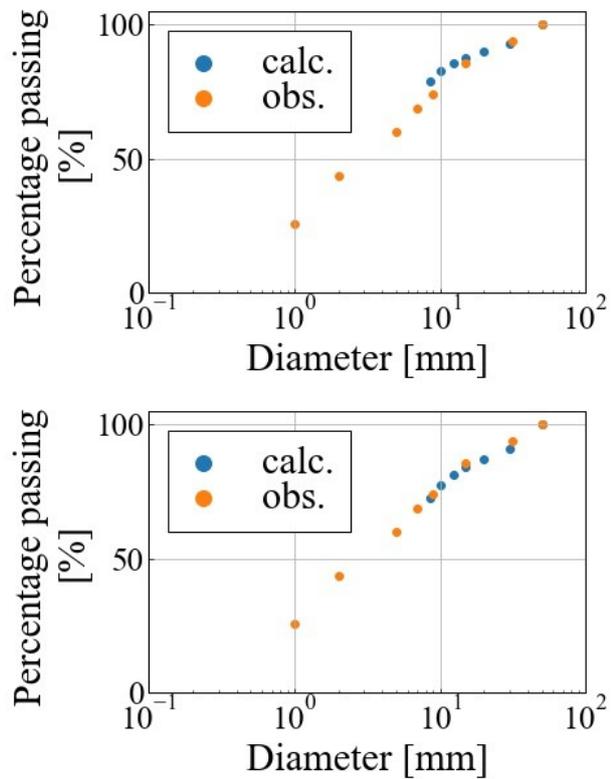


図-7 上：ふるい結果と算出された粒度分布の比較, 下：ふるい結果に $\alpha$ を一致させた時の粒度分布 (2017年9月22日0時から9月23日0時)

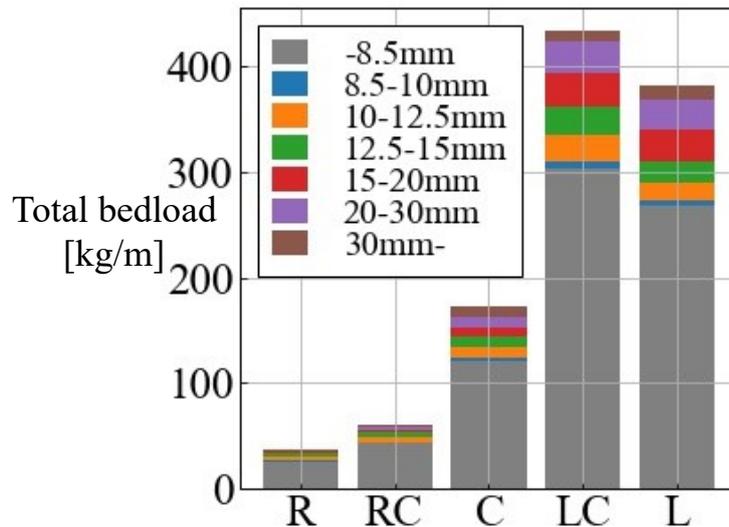


図-8 水路横断方向に設置された各ハイドロフォンに対する流砂量 (2018年1月1日から2019年8月29日)

## ⑦研究成果の発表状況・予定

- ・これまでに発表した代表的な論文

Tsutsumi, D., Fujita, M., Nonaka, M., Bedload transport measurement with a horizontal and a vertical pipe microphone in a mountain stream: taking account of particle saltation, Earth Surface Processes and Landforms, 43 (5), <https://doi.org/10.1002/esp.4297>.

Koshihara, T., Auel, C., Tsutsumi, D., Kantoush, S. A., Sumi, T. (2017). Application of an impact plate - bedload transport measuring system for high-speed flows, International Journal of Sediment Research, 33 (1), pp.35-46.

- ・国際会議、学会等における発表状況

堤大三，宮田秀介，市田児太郎，野中理伸：山地溪流における流砂量の横断分布観測，砂防学会研究発表会岩手大会，2019.

Tsutsumi, D.: Surrogate methods for bedload monitoring in mountainous streams -estimation of quantitative sediment discharges by Japanese acoustic pipes-, International Symposium of Civil, Environmental, and Infrastructure Engineering at UMY, Kasihan, Indonesia, 30 - 31 Jul 2019.

## ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

## ⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

## ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究課題で確立した、パイプハイドロフォンによる掃流砂の定量的・連続観測手法によって、今後も焼岳山麓の足洗谷流域での土砂動態を継続して観測し、火山活動及び豪雨による土砂移動量の変化をとらえることで大規模土砂災害発生の前兆をとらえ、土砂災害の軽減・防止につながるようなデータの蓄積を行う。足洗谷での観測による大規模土砂災害予測をモデルケースとし、全国における土砂災害危険流域における早期警戒システムに資する情報提供が可能となることを目指す。

一方、足洗谷で採用しているパイプハイドロフォンシステムは、掃流砂計測には非常に有効であることが確かめられているが、巨礫を含む土石流のような大規模な土砂移動に対しては、脆弱であり、容易に破壊される事例が起きている。そのような大規模土砂移動の際にもパイプハイドロフォンシステムと並行して継続的に土砂移動を定量評価できる別のシステムの開発も必要と考えられ、パイプハイドロフォンによる定量的な土砂移動量と新たな別システムによるデータの比較検討を行うことで相互互換可能な観測システムの構築につなげていく予定である。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

土砂災害の軽減・防止および流砂系における総合的土砂管理のためには、山地河川域で発生し流下する移動土砂量を定量的に把握する必要があるとあり、本研究課題で開発したパイプハイドロフォンによる掃流砂量の定量化手法は、この目的に合致しており有効な方法であるといえる。現在、多くの河川におけるハイドロフォンデータの解析には、直接法によるキャリブレーションが不要であり簡便に流砂量を推定できるため国総研が開発した音圧法が多く採用されているが、その信頼性を確かめるためにはやはり直接法による観測が不可欠である。本研究課題で開発した手法による掃流砂量の定量化と併用することでより流砂量の精度を向上させることができると期待される。また、本研究課題で開発した手法によれば、掃流砂量の全量だけでなく、粒径別の流砂量(粒度分布)をある程度推定することも可能となることから、量的な情報だけでなく掃流砂の質に関する情報を得ることができる。ただし、そのためには、やはり直接法による土砂採取を行ったうえで、すべての期間でなくてもよいが、一定期間における流砂の粒度分布を計測する必要があり、そのプロセスをどのように省力化するかといった課題も残っている。