

掃流砂観測におけるプレート型ジオフォンと パイプ型ハイドロフォンの比較

Comparison of Responses from Plate Geophone and Pipe Hydrophone Sensors for Bed-load Monitoring

堤大三・野中理伸⁽¹⁾・水山高久⁽²⁾・藤田正治・宮田秀介・市田兎太郎

Daizo TSUTSUMI, Michinobu NONAKA⁽¹⁾, Takahisa MIZUYAMA⁽²⁾,
Masaharu FUJITA, Shusuke MIYATA and Kotaro ICHIDA

(1) ハイドロテック株式会社

(2) 京都大学大学院農学研究科

(1) Hydro-Tech Co. Ltd., Japan

(2) Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Japan

Synopsis

To compare responses of bedload measured by the pipe hydrophones and plate geophones, both sensors are installed at the same sites in the Ashiarai-dani, Japan and the Erlenbach, Switzerland. Contemporaneous sensor and bedload data were obtained during the rainfall events. From the results, responses from the hydrophone and geophone sensors show liner relationship, however, the sensitivity for smaller sediment by the hydrophone is higher than geophone. It is suggested that the combination of both sensors is a appropriate method of bed load monitoring.

キーワード: パイプハイドロフォン, プレートジオフォン, 足洗谷, エルレンバッハ
Keywords: pipe hydrophone, plate geophone, Ashiarai-dani, Erlenbach

1. はじめに

山地流域における土砂動態に関して、観測される流砂量は土砂生産・供給源の規模や季節変動に依存し、河川流量のみに依存するわけではないことが知られている。このため、流域の総合的な土砂管理や、土砂・河川災害の防止・軽減のためには、流砂量の実測が不可欠である。日本では、音響センサーを利用したパイプ式ハイドロフォンによる掃流砂観測手法が広く用いられるようになり、山地河川での流砂量の連続モニタリングが可能となりつつある(堤ら, 2013)。一方で、スイスにおいて開発されてきた、プレート式ジオフォンによる掃流砂観測手法はスイスやオーストリア、イタリアといったヨーロッパ諸

国で用いられている (Rickenmann et al., 2012)。

主に日本で用いられるパイプ式ハイドロフォンは、河床に鉄パイプを設置して、これに衝突する砂礫の数を数えるものである。一方、スイスで用いられるプレート式ジオフォンは、床固めの天端に鉄板を設置しその上を通過する礫による振動を計測して礫の数を数えるものであり、日本においてハイドロフォンが開発される以前から開発が進められてきた。両者は、掃流砂の計測方法としては、類似した原理を用いているが、使用するセンサーの違い等により、それぞれに異なる特徴が見られる。日本のパイプ式ハイドロフォンは4 mm程度の粒径から計測が可能であるが、スイスのプレート式のジオフォンはcmオーダー以上の礫によりよく反応する。また、日本

のパイプ式ハイドロフォンは大きな礫が衝突すると変形し、取替えが必要となるが、スイスのプレート式ジオフォンは鉄板を厚くすれば土石流でも計測できる耐久性を持っている。

この様に両者は、基本構造や用いるセンサーの違いから、それぞれの利点や欠点があるが、これまでは異なる流域環境下で個別に計測された結果を定性的に比較することとどまり、定量的な比較検討がなされてこなかった。2012年以降、Swiss Federal Institute WSLとの共同のもと、日本の足洗谷とスイスのErlenbachにハイドロフォンとジオフォンの双方を設置し、それぞれの流砂量観測特性を定量的に比較しようとする検討が進められてきた。実際に日本の足洗谷とスイスのErlenbachにおいて、パイプ式ハイドロフォンとプレート式ジオフォンの双方を設置し、掃流砂観測における観測結果を比較検討した。本稿ではその結果について報告する。

2. 観測対象流域と各計測機器の説明

2.1 足洗谷流域

観測流域である足洗谷は神通川水系に属し、神通川支流の高原川の上流域にあたり、岐阜県北東部に位置する。流域の周囲は標高3,000 m級の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で蒲田川に合流している（Fig. 1）。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河道に供給され、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箇所にはハイドロフォンが設置されている。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。

既存のパイプ式ハイドロフォンとピット式流砂量計の配置をFig. 2に示す。ハイドロフォンに衝突した土砂粒子が全てピット式流砂量計に捕捉されるように、ハイドロフォンの直下流にピットのスリットが位置する様な配置となっている。Fig. 2の写真の撮影時は、ハイドロフォンのパイプの露出長さは35 cmであったが、補修後には30 cmに変更している。また、

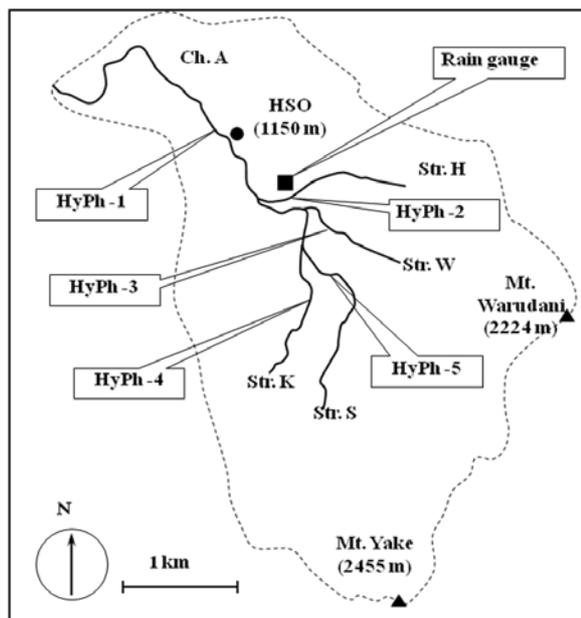


Fig. 1 Map of the observation watershed "Ashiarai-dani" and the locations of hydrophone installation



Fig. 2 A pipe hydrophone and a pit sampler at the Ashiarai-dani station

ピット式流砂量計のスリットの幅は20 cmである。上述のとおり、本研究では既存の計測機器に加え、プレート式ジオフォンを新たに設置した。各機器の配置を、Fig. 3に示す。上流から、プレート式ジオフォン、パイプ式ハイドロフォン、ピット式流砂量計の順にコンクリート水路の横断方向中心線に沿って配置されている。各機器の間隔は、プレート式ジオフォンとパイプ式ハイドロフォン間が2.3 m、パイプ式ハイドロフォンとピット式流砂量計間が0.25 mである。各機器のサイズはプレート式ジオフォンが流下方向0.36 m×横断方向0.49 m、パイプ式ハイドロフォンが外径25mm×横断方向0.3 m、ピット流砂量計のスリット幅0.2 mである。

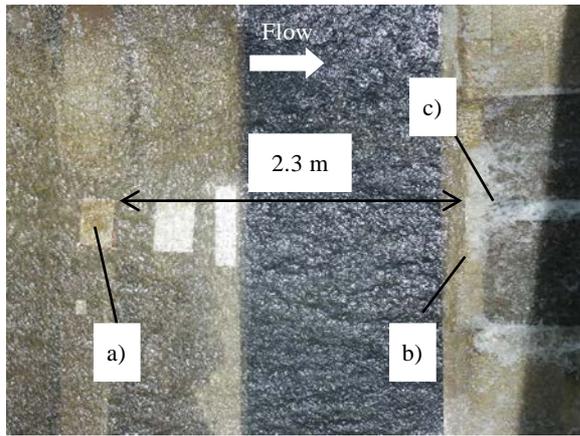


Fig. 3 Installation of equipments, a: plate geophone (490×360 mm), b: pipe hydrophone ($\phi 25$ mm×300 mm), c: pit sampler (200 mm)

2.2 Erlenbach流域

対象流域であるErlenbach川はスイス北部のSchwyzカントンにあり、チューリッヒから南に約40 kmの場所に位置するFig. 4. 流域面積は約0.7 km²と小さく、一部は牧草地帯、一部は森林に覆われたサブアルパイン地域の山地河川である。夏季の降雨によって頻繁に土砂流出が発生する特性をもち、年に10数回の土砂移動イベントが発生する。流域の最下部近傍には、貯水池が設けられており、流下した土砂の総量を計測することが可能となっている (Photo 1)。観測地点の河道は、人工的に整地された固定床となっており、観測地点上流50 mの河床勾配は11%である。

Erlenbach観測地点では、20年以上前からプレート式ジオフォンの開発がおこなわれており、Fig. 5に示すように、河道横断面を全てカバーするように複数のプレートジオフォンが設置されている。その内、Geophone 3とGeophone 4の計測範囲 (50 cm + 50 cm) が先に説明したバスケットサンプラーの土砂捕捉幅 (1 m) に対応するものであり、本研究においてはGeophone 3, 4のデータのみ取り扱うものとする。

ハイドロフォンとジオフォンとを比較するため、流域の最下端に近い貯水池への流入部にパイプ式ハイドロフォンを新に設置した。パイプの露出長さは1 mであり、Geophone 3, 4やバスケットサンプラーの土砂捕捉幅と同じである。

先に説明した通り、Erlenbachには、定量的な流砂量観測のためのバスケット型のサンプラーが3台設置されており、イベントの発生と共に稼働する仕組みになっている。なお、バスケットのメッシュサイズは10 mmであるが、1台目のバスケットのみ内側に2 mmのサイズのメッシュを貼り付けており、それぞれメッシュサイズ以上の土砂を採取できるようにな



Photo 1 Observation site at Erlenbach and the retention basin



Fig. 4 Location of the observation watershed "Erlenbach" in Switzerland

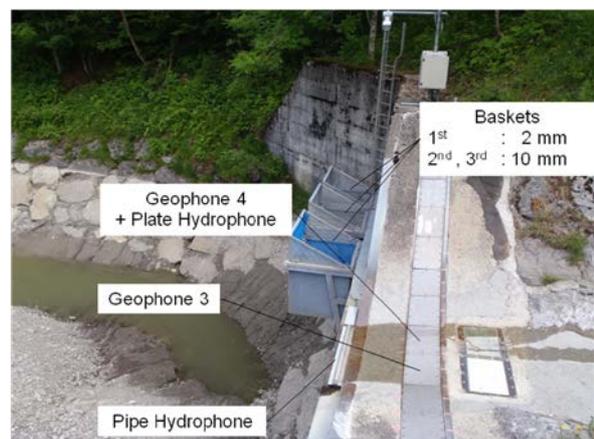


Fig. 5 Installation of the equipments, plate geophone 3, and 4; pipe hydrophone; basket samplers 1, 2 and 3

っている。また、バスケットから設置壁面に対する垂直荷重が計測されており、イベント終了後に計測する土砂総重量とから、バスケットで捕捉される土砂量の経時変化を計測することが出来る。パイプ式ハイドロフォン、プレート式ジオフォン、バスケット

トサンプラーの設置状況をFig. 5に示す。

3. 観測結果

3.1 足洗谷流域

観測期間中、足洗谷では数回の土砂移動イベントが発生したが、本稿では、2013年6月19–22日の期間の土砂移動イベントに対する観測結果を示し、検討を行う。プレート式ジオフォンによって計測された振動波形の積分値の変化を水位変化と共にFig. 6に示す。19日3:00頃からの水位上昇に伴ってジオフォンが反応し始め、水位のピーク時にジオフォンの反応もピークに達している様子が示されている。その後、水位は徐々に減衰するが、ジオフォンの反応は増減を繰り返しながら継続し、21日0:00以降によくおさまっている。水の流出が収まっても掃流砂が数波にわかれて流下している状況をよく示している。

一方、パイプ式ハイドロフォンによる計測パルス数の変化（ここでは、代表してゲイン16と1024）をFig. 7に示す。ゲインを大きく設定した場合のパルス数は、粒径の小さな掃流砂の衝突音まで反応するため、パルス数が多く計測されるが、ゲインを小さく設定した場合は逆に、粒径の大きな掃流砂の衝突の

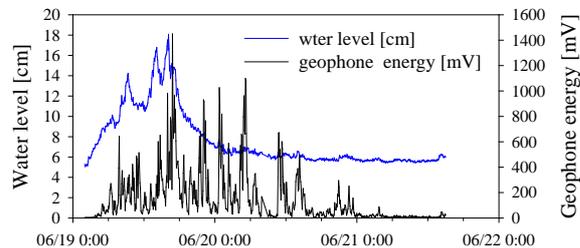


Fig. 6 Temporal changes of water level and geophone energy (5 min averaged) observed at Ashiarai-dani watershed during a rainfall event from June 18 to 22, 2013

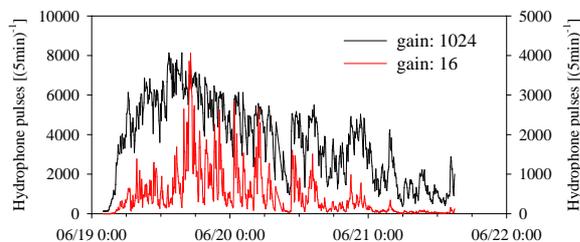


Fig. 7 Temporal changes of hydrophone energy (5 min averaged) observed at Ashiarai-dani watershed during a rainfall event from June 18 to 22, 2013

みを捕捉するため、パルス数が少なくカウントされる。Fig. 7においても、その傾向が明確に表れている。

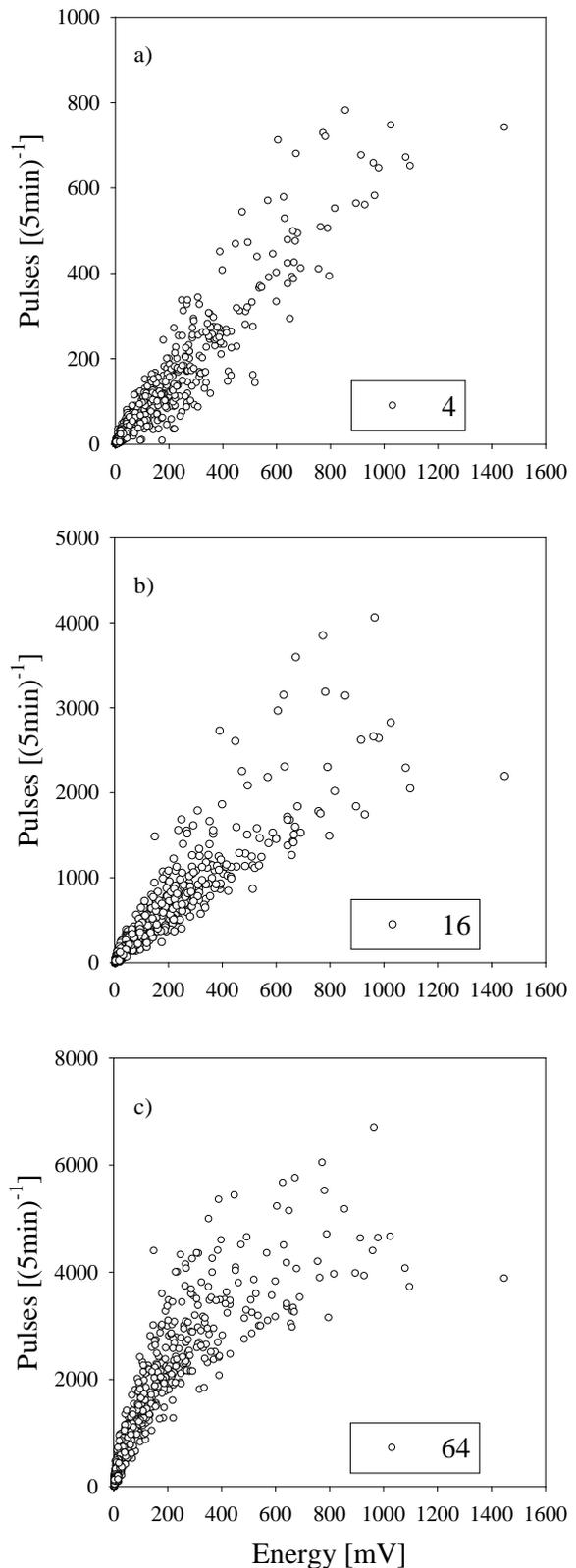


Fig. 8 Relationship between Geophone energy and hydrophone pulses; a) gain = 4, b) gain = 16, c) gain = 64

また、Fig. 6のプレート式ジオフォンの計測値と比較すると、ゲイン16のパルス数と波形がほぼ同じ反応を示している。このことから、プレート式ジオフォンとゲインを16程度に設定したパイプ式 hidroフォン の計測値が対応しており、この場合に計測の対象となっている掃流砂の粒径が両者で同等の大きさであることがわかる。一方で、ゲインを1024と設定した場合は、ジオフォンやゲイン16の場合の hidroフォン の変化とは異なる傾向を示し、ピークがそれらのものより鋭くない。これは、流砂量が多い場合に発生するパルスの飽和が起きているためであると考えられる。

プレート式ジオフォンとパイプ式 hidroフォン の掃流砂に対する反応を直接比較するため、プレート式ジオフォンとパイプ式 hidroフォン の計測値の相関をFig. 8に示す。プレート式ジオフォンとパイプ式・プレート式 hidroフォン の相関において、ゲインが4倍や16倍と小さいときは、線形に近い相関を示すが、ゲインが64倍以上の場合は横に寝たような相関に変化する。これは、ゲインを大きく設定した場合、粒径の小さな掃流砂の衝突音も捕捉しパルスの飽和が起きやすいのに対し、プレートジオフォンは大きな粒径の掃流砂の振動しか捕捉していない事で説明され、ゲインが16倍以下の hidroフォン がその衝突音を捕捉している粒径とジオフォンの計測対象粒径が同じ程度である事を示している。

3.2 Erlenbach流域

Erlenbach観測地点においても2013年の観測期間内に数回の土砂移動イベントが発生した。ここでは、その内2013年7月29日のイベントについての結果を示す。Photo 2は、土砂移動イベント時において濁水が流路を流下し、末端においてバスケットサンプラーを通過することでメッシュサイズ10 mm以上の掃流砂が捕捉され、残りの土砂と濁水が貯水池に流入している様子を示している。このイベントの際に、プレート式ジオフォンにて計測されたインパルス数の変化をFig. 9に示す。29日の10時前頃からジオフォンに反応が表れ、11:30過ぎにピーク値に達した後ですぐに終息し、15時前後の1時間程度の中に再びジオフォンに反応が表れている。1回目のイベント継続時間は2.5時間程度と短く、短期間の雷雨によって生じた流出である事がわかる。

同じイベントにおける、パイプ式 hidroフォン による計測結果を、Fig. 10に示す。土砂移動イベントに対する反応の変化は、ジオフォンのそれとほとんど同じであり、パイプとプレートという構造の違いがあっても、ジオフォンとパイプ式 hidroフォン が同様に機能していることが示されている。



Photo 2 Bedload sampling by a moving basket at a rainfall event on July 29, 2013

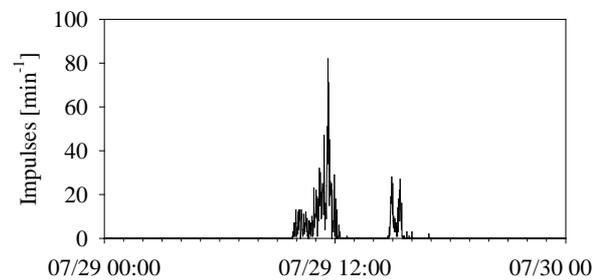


Fig. 9 Temporal changes of geophone impulses (1 min averaged) observed at Erlenbach watershed during a rainfall event on July 29, 2013

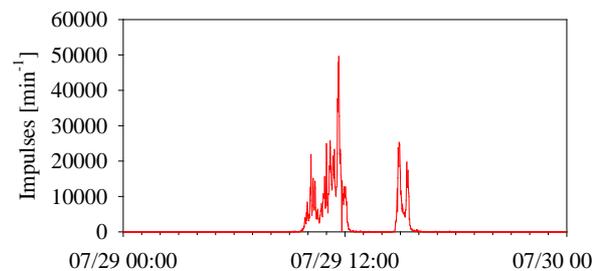


Fig. 10 Temporal changes of hydrophone impulses (1 min averaged) observed at Erlenbach watershed during a rainfall event on July 29, 2013

プレート式ジオフォンとパイプ式 hidroフォン の計測値の相関をFig. 11に示す。足洗谷での計測結果と比較すると、足洗谷でのジオフォン振動波形の積分値とゲインが小さい場合の hidroフォン パルスとの間で見られた相関ほどは高くないが、Erlenbachでのジオフォンと hidroフォン の反応の間には、やはり線形関係が見られる。これは、足洗谷ではゲインが小さい場合(大粒径)に相関が高く、ゲインを大きくすると(小粒径も含む)相関が小さ

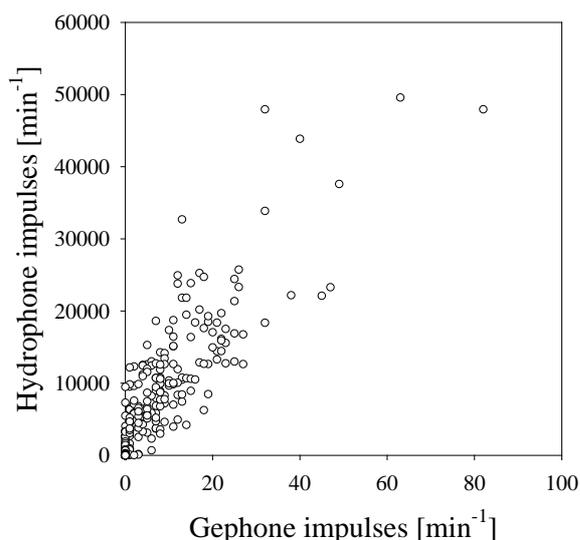


Fig. 11 Relationship between Geophone and hydrophone impulses

くなった結果を考慮すると、Erlenbachでは、データ処理方法の違い（Erlenbachでは音響波形そのものの振動をとらえている）から、足洗谷での大きなゲインを採用している場合に近いが、パルスの飽和による計測値の減少が表れにくいという双方の効果によるものであると考えられる。

プレート式ジオフォンとパイプ式 hidroフォンによる掃流砂計測がほぼ同じ傾向を示す事を示したが、計測値の絶対値自体を比較すると、ジオフォンが最大で80 [impulses/min]であるのに対し、hidroフォンでは最大50,000 [impulses/min]に達しており、その間には600倍の違いがある。これは、ジオフォンに比べてhidroフォンが粒径の細かい土砂成分にも反応する事で、捕捉する衝突音の数が増えるという事と、ジオフォンが振動波形のインパルスをカウントしているのに対し、hidroフォンはそもそも振動数の多い音響波形のインパルスをカウントしているため、たとえ単一の土砂衝突を計測している場合でもインパルス数はもともとhidroフォンの方が多くなってしまいう事が原因として挙げられる。このため、前章までに示した様に、ジオフォンで計測されるインパルスが通過した礫の個数におよそ対応しているのに対し、hidroフォンによって計測されるインパルスは、実際の土砂個数よりも多い値を示している事に注意する必要がある。

4. おわりに

これまで、日本とスイスにおいて個別に開発され活用されてきたパイプ式hidroフォンとプレート

式ジオフォンは、それらの構造やセンサーの違いから、設置のしやすさ、耐久性や検知可能な土砂粒径等、それぞれの特徴を有することが知られており、定性的な比較が行われてきた。本研究では、日本の足洗谷とスイスのErlenbachの2観測地にパイプ式hidroフォンとプレート式ジオフォンの両方を設置し、土砂移動イベント時の同時観測を行う事で、定量的な比較検討を実施した。

本研究で得られた結果や既往の研究の成果から、各機器の特徴としては、1)プレート式ジオフォンは大径礫の衝突でも破損しにくいのに対し、パイプ式hidroフォンは破損しやすい、2)プレート式ジオフォンは粒径10 mm以上の掃流砂しか反応しないのに対し、パイプ式hidroフォンは4 mm程度の掃流砂にも反応し感度が高い、3)パイプ式hidroフォンは流砂量の多い場合にパルスの飽和が発生する場合がある、4)プレート式ジオフォンは設置場所に制限が多いがパイプ式hidroフォンは比較的容易に設置できる。これらの特徴に従い、設置条件に制限がある場所、流砂量が極端に多い場所、粒径の比較的小さい掃流砂が支配的な場所、流速が早く砂礫衝突によるダメージが大きい場所といった様々な観測条件に合わせ、最適な計測機器を選択し、または複数を組み合わせ掃流砂観測を実施することが肝要である。

謝 辞

本研究は、Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSLとの共同で実施し、スイスでの観測においては、Dieter Rickenmann博士、Carlos Wyss氏、Bruno Fritschi氏らに多大な協力を頂いた。また、本研究の一部はH25年度砂防・地すべり技術センター研究開発助成によって実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 堤 大三・水山高久・野中理伸・藤田正治・志田正雄 (2013): 山地流域における定量的な掃流砂量計測, 京都大学防災研究所年報, 第56号B, pp. 465-472.
- Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Klaiher, A., and Ludwig, A. (2012): Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 37, Issue 9, pp. 1000-1011.

(論文受理日: 2014年6月11日)