

## 鉛直分布を考慮した掃流砂観測手法の検討

### Bedload Monitoring Method Considering Vertical Concentration Profile

堤 大三・天野唯子<sup>(1)</sup>・長谷川祐治・市田児太朗・野中理伸<sup>(2)</sup>

Daizo TSUTSUMI, Yuiko AMANO<sup>(1)</sup>, Yuji HASEGAWA, Kotaro ICHIDA and Michinobu NONAKA<sup>(2)</sup>

(1) 京都大学大学院農学研究科

(2) ハイドロテック株式会社

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

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

#### Synopsis

For monitoring bedload transport in mountainous stream, pipe hydrophones are one of the effective method. Recently, the pipe hydrophone system has been practically utilized in many rivers in Japan. The pipe hydrophone is usually installed on a river bed perpendicular to the water flow. Acoustic pulses caused by sediment collisions are detected by the pipe hydrophone. Because of the detection method, the sediment passing through the pipe with no collision on the pipe cannot be detected by the system. To solve this disadvantage, we proposed a set of horizontal and vertical pipe hydrophones. We installed the horizontal and vertical hydrophone in the Ashi-arai-dani observation flume and conducted a field experiment. We also conducted a bedload measurement during snowmelt flood events. The experimental and observation results show the possibility to monitor total bedload by this hydrophone set.

**キーワード:** 鉛直ハイドロフォン, 掃流砂観測, 鉛直分布, 足洗谷

**Keywords:** vertical hydrophone, bedload monitoring, vertical profile, Ashi-arai dani

#### 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、流量の増減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開発され (Baezinger and Burch, 1990; 水山ら, 1996), 現在では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。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. 2014)。

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、このパイプの露出部に衝突する砂礫が発する音響パルスを数え、間接的に掃流砂量を計測するものである。このため、掃流砂量を求めるためには基本的に直接的な計測手法 (掃流砂の直接サンプリング等) と併用することで、音響パルスと掃流砂量の関係をキャリブレーションする必要がある。京都大学防災研究所、穂高砂防観測所

の観測水路（足洗谷）では、パイプ hidroフォン の直下流にピットサンプラーを設置し、hidroフォンを通過した掃流砂がピット内に堆積し、その重量変化を計測することで掃流砂量を直接計測している。この掃流砂量とhidroフォンの計測値とのキャリブレーションから、常時連続観測を試みている（堤ら，2013）。また、hidroフォンに土砂粒子が衝突した際の音響波形データそのものを解析して流砂量を算出する手法も提案されており（鈴木ら，2010），この場合は直接間接法を併用したキャリブレーションが不要となる利点があり、日本全国において国土交通省の各砂防および河川事務所が設置したhidroフォンはこの方法によって掃流砂量を算定している（例えば，富田ら，2015；叶ら，2015）。

このように、hidroフォンを用いた山地河川における掃流砂計測が実際の運用段階に入っているものの、未だ解決すべき課題が残されている。その一つとして、パルスの飽和が挙げられる。これは、掃流砂量が非常に多くなった場合、複数の砂礫が同時にパイプに衝突する際、パルスどうしが重なりあう事で、実際の砂礫数よりもパルスが過少に検出される問題である。この課題に対しては、砂礫衝突の際の音響パルスではなく、音響波形の積分値（音圧）を算出することで解決する方法が提案されている（水山ら，2008）。一方、音響波形データそのものを解析して流砂量を算出する手法では、音波の干渉を考慮して衝突個数を推定する手法によって検出率の低下を推定している（鈴木ら，2010）。

もうひとつの課題として、そもそも掃流砂礫がhidroフォンの検知部である金属パイプに衝突せずに通過してしまう事により、掃流砂量を過少に評価してしまうことが挙げられる。直接計測との併用により掃流砂量を推定する手法では、パイプに衝突せずに通過した砂礫も含めて掃流砂量として全量計測しているとの仮定から、hidroフォンでの間接手法による検出値と直接計測による掃流砂量との関係には、全通過砂礫に対する衝突砂礫の割合（衝突率）が含まれていると考えることができる。しかしながら、この衝突率は常に一定ではなく、水深や流速といった水理条件の違いや、砂礫の粒度分布の違いによって異なると考えられるため、異なる条件下でのキャリブレーション関係の不均一性の原因になっているものと思われる。一方で、音響波形そのものを解析する手法では、衝突した砂礫のみを対象としているため、衝突せずに通過した砂礫の情報は全く含まれていないという問題が残る。

本研究は、hidroフォンによる掃流砂観測手法の課題に対して、特に衝突せずに通過する砂礫をも考慮した計測手法を検討することで、掃流砂量計測



Photo 1 Horizontal and vertical hydrophone set installed in the Ashi-arai dani observation flume

の高精度化を図ることを目的として実施した。河床に設置したhidroフォンパイプに衝突せずに通過する砂礫を考慮するためには、鉛直方向に分布して流下する砂礫を考慮する必要がある。そのためは、河床に水平に設置するhidroフォンだけでなく、河床に対して鉛直方向に設置するhidroフォンが有効であると考えた。そこで、足洗谷観測水路において河床に水平に設置したhidroフォンと全く同じ性能のhidroフォンを水路側壁に河床に対して鉛直に設置することで新たな観測手法を実践することとした（Photo 1）。河床に対して鉛直方向にhidroフォンを設置する観測手法は既に提案され、実際に観測がおこなわれている（三上ら，2012）。ただし、この既往事例の場合は、鉛直方向に複数のパイプhidroフォンを設置し、各設置高さでの掃流砂量を計測して段階的な鉛直分布をとらえようとする考え方であるのに対し、本研究においては、鉛直方向hidroフォンをひとつだけ設置して、その計測値から水平方向のhidroフォン計測値を補正するという考えに基づくものであり、この点で既往事例と異なる。

本稿では、河床に対して水平・鉛直方向に設置するhidroフォンを用いた新たな計測手法の説明を行い、その手法を用いた現地実験と現地観測における計測結果をもとに検討する。

## 2. 水平・鉛直hidroフォン計測の解析方法

従来通りの水平hidroフォンに加えて鉛直hidroフォンを設置した計測システムによる掃流砂計測原理についての仮説を以下に示す。

まず、横型hidroフォンと縦型hidroフォンによって得られる検出パルス数をそれぞれ $P_h$ 、 $P_v$ とする。仮に、理想的な（パルスの飽和が無い）状態

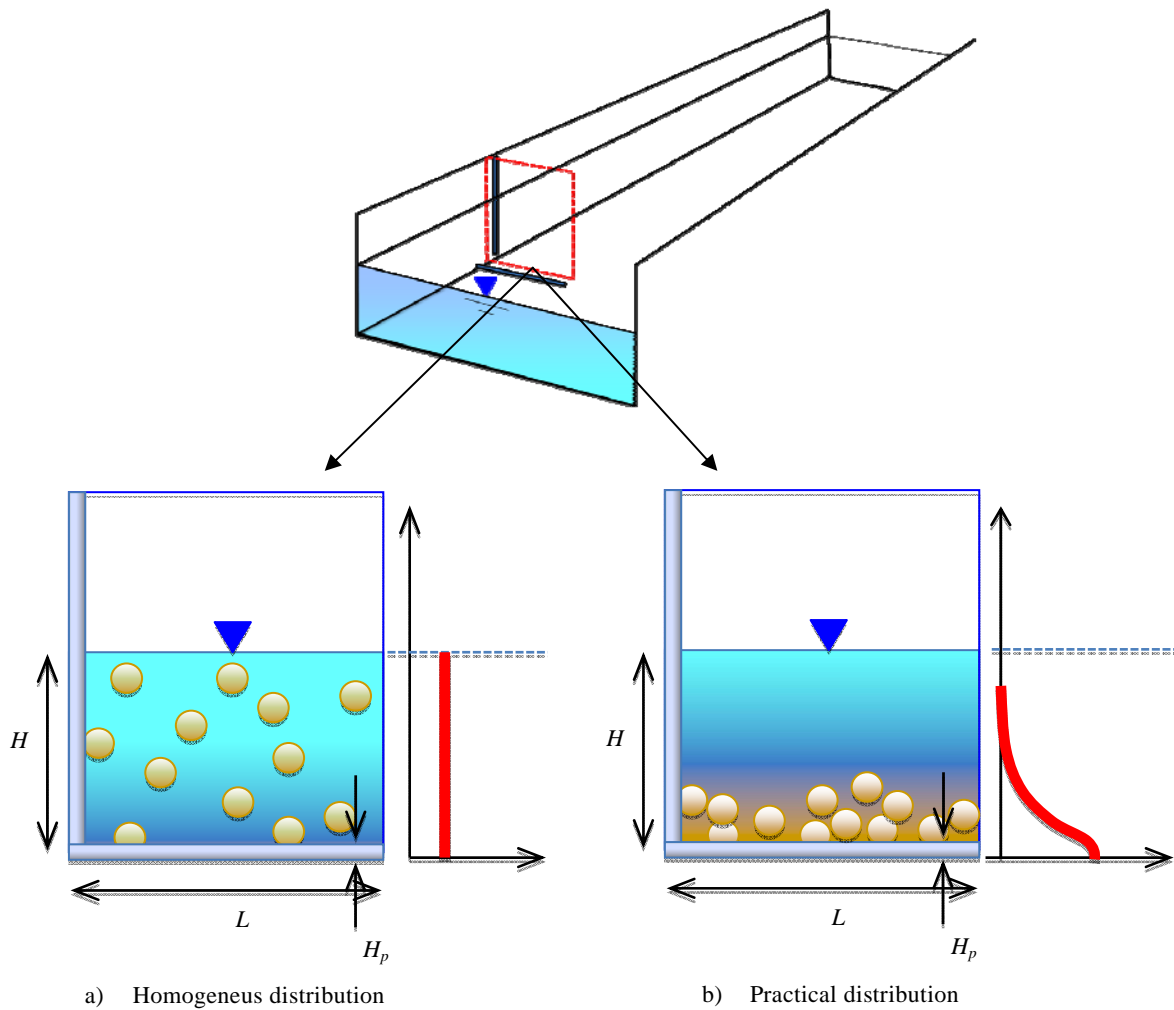


Fig. 1 Observation hypothesis for the horizontal and vertical hydrophone set

で計測ができ、かつ河川断面内を砂礫が均一に分布して流下している場合を想定すると (Fig. 1a), 単位長さあたりの検出値は,

$$\frac{P_h}{L} = \frac{P_v}{H} \quad (1)$$

となる. ここで,  $L$ : 水平ハイドロフォン長さ,  $H$ : 水深である. しかし, 現実には掃流砂は鉛直方向に分布を持っており (Fig. 1b), 河床に近い位置ほど土砂濃度が高くなるため, 当然河床に設置されている水平ハイドロフォンによる検出値のほうが大きくなると考えられるため,

$$\frac{P_h}{L} > \frac{P_v}{H} \quad (2)$$

が通常の状態と考えられる.

鉛直ハイドロフォンは単体で設置されているため, パイプのどこに砂礫が衝突したかまではわからないので, Fig. 1bに示した様な鉛直方向の分布はわからないが, 水平・鉛直ハイドロフォンの検出値の比 $R_{hv}$ をとれば, 砂礫の濃度が鉛直方向に分布をもつ (Fig. 1b) ことによって, 仮想的な均一分布の状態 (Fig. 1a)

から, 全体としてどれだけ通過砂礫の総量が減少しているのかという比率がわかる.

$$R_{hv} = \frac{P_v / P_h}{H / L} \quad (3)$$

$R_{hv}$ は, 水平ハイドロフォンによる砂礫検出時 ( $P_h > 0$ ) には, 式(2)から,  $0.0 < R_{hv} < 1.0$ の範囲の値をとると想定される. この比率を用いて,  $L \times H$ の流水断面を通過する掃流砂の仮想的なパルス総検出量 $P_t$ は,

$$P_t = R_{hv} \frac{H}{H_p} P_h \quad (4)$$

と表すことができる. ここで $H_p$ はハイドロフォンパイプの検知部高さである.

検出値として, 音響波形の積分値 $A_h, A_v$ を用いる場合, 水平・鉛直の検出比率 $R_{hv}$ と総検出量 $A_t$ は同様に,

$$R_{hv} = \frac{A_v}{H} / \frac{A_h}{L} \quad (5)$$

$$A_t = R_{hv} \frac{H}{H_p} A_h \quad (6)$$

となる。

本研究で提案する、河床に設置された水平ハイドロフォンパイプに実際には衝突せずに通過した砂礫をも含めた検出値が、上記の式(4), (6)で示した $P_t$ ,  $A_t$ である。これら $P_t$ ,  $A_t$ は仮想的な値であるが、これらが正しいと仮定した場合、通過砂礫の総量の内、どれだけの砂礫が水平ハイドロフォンによって検出されたかという検出率 $DR$  (Detection Rate) は、

$$DR = \frac{P_h}{P_t} \quad (7)$$

または、

$$DR = \frac{A_h}{A_t} \quad (8)$$

と表わされる。この検出率 $DR$ は、その定義から $0.0 < DR < 1.0$ の範囲の値となるはずであるが、実際の観測では、例えば砂礫分布の横断方向の偏り等により、鉛直ハイドロフォンへの砂礫の衝突が抑制された場合、検出値 $P_h$ や $A_h$ が過少となることで、 $R_{hv}$ さらには $P_t$ ,  $A_t$ が過少となり、結果として $DR$ が1.0を超える値となる事も起こり得ると予想される。

### 3. 現地実験

#### 3.1 実験方法

2章において議論した式(3)および(5)の $R_{hv}$ が、水平・鉛直ハイドロフォンによって実際にどのように計測されるかを検証する実験を行った。水平・鉛直ハイドロフォンセットは、穂高砂防観測所の足洗谷観測水路に設置した。水平ハイドロフォンのセンサー部長さは0.35 mである。コンクリート水路の右岸側一部を板で0.35 mの水路に仕切り、河川水の供給量を調整して流量を設定し、水深と流速はそれぞれ0.055 m, 2.07 m/sと0.11 m, 2.14 m/sでの実験を行った。供給する砂礫は粒径①2.0 - 3.0 mm, ②3.0 - 4.7 mm, ③4.7 - 7.0 mm, ④20 - 25 mmの4種類をそれぞれ200g程度準備し、それぞれ3回ずつ供給した。供給砂礫の個数はそれぞれおよそ①10,000個, ②2,700個, ③900個, ④10個である。砂礫の供給によってハイドロフォンが検出するパルス値および音響波形の積分値を記録した (Photo 2)。

#### 3.2 実験結果

水深0.11 mの場合の水平・鉛直ハイドロフォンそれぞれによるパルス値の計測結果 (単位長さ辺り) をFigs. 2, 3にそれぞれ示す。水平ハイドロフォンでは、粒径界①~③の検出値が過少となっている。特に増幅率 (ゲイン) が小さい場合 (64) その傾向が顕

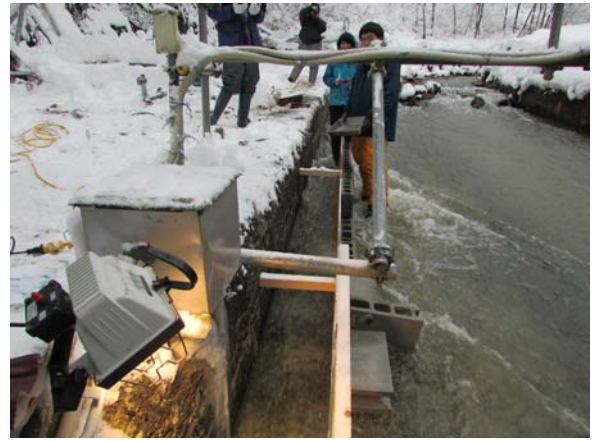


Photo 2 Field experiment in the Ashi-arai dani

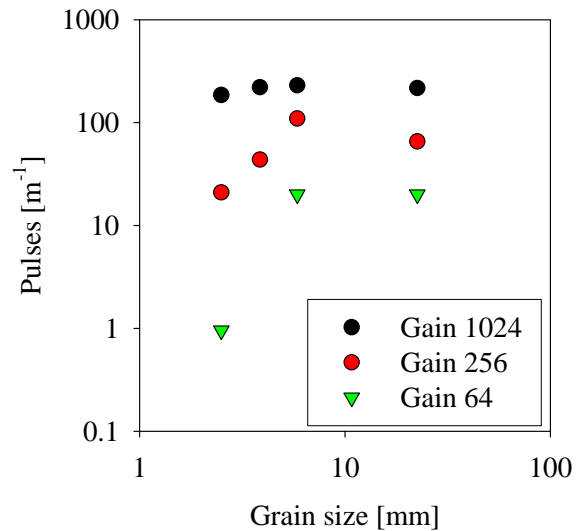


Fig. 2 Measured pulses by the horizontal hydrophone

著である。これは、粒径の小さな砂礫の場合には、増幅率を大きくしないと検出できないというハイドロフォンの性能によるものが大きい。一方で、増幅率が最大の1024の場合でも、例えば最小粒径界①の場合でも、過小評価となっている。これは、砂礫がハイドロフォンに衝突せずに通過した可能性を示している。粒径界④の場合は、増幅率が64, 256の場合に、オーダー的には適切なパルス数を示しており、この計測が正常になされている事を示している。

比率 $R_{hv}$ を見た場合 (Fig. 4), およそ1.0以下の数値を示していることから、前章において示した仮説がある程度正しい事が検証された。しかしながら、ゲインが最大の場合、粒径界④において1.0を超える値を算出している事や、実験時の砂礫挙動の観察から、実験における供給砂礫の数が十分ではなく、適切な検出がなされたかどうか、疑問が残る結果となった。このことから、実験だけでなく実際の掃流砂観測によって、総掃流砂量の推定をする必要があることが示された。

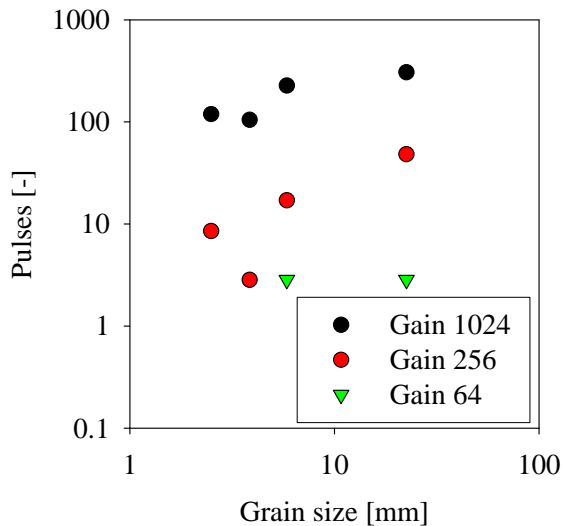


Fig. 3 Measured pulses by the vertical hydrophone

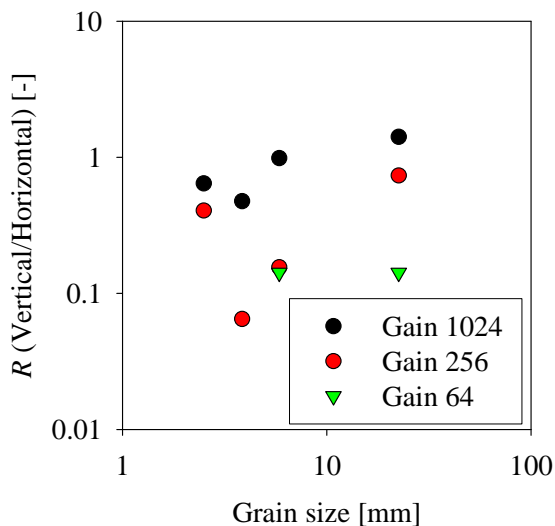


Fig. 4 Pulse ratio by horizontal and vertical hydrophones

#### 4. 現地観測

2014年8月に水平・鉛直ハイドロフォンセットを設置し、観測を開始して以降、2015年になり、融雪出水が始まったことで、土砂移動も活発になり、解析に適したイベントが4月に観測された。以下にその状況を示し、解析結果を示す。

##### 4.1 融雪出水・土砂移動イベントの状況

4月1日から10日にかけて、断続的な降雨が観測され、それに促される形で融雪が進み、足洗谷にて出水・土砂移動イベントが発生した。Fig. 5に降雨状況を示す。およそ20 - 25 mmのひとまとまりの降雨が4回とそれより少ない降雨が2回観測され、この期間の総降雨量は104.5 mmであった。最大の降雨強度は6.5

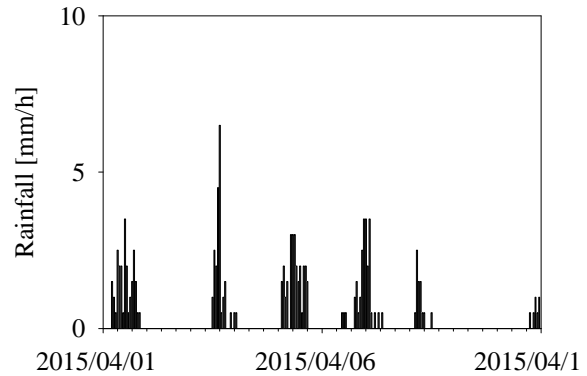


Fig. 5 Precipitation during the snowmelt season (1- 10 April, 2015)

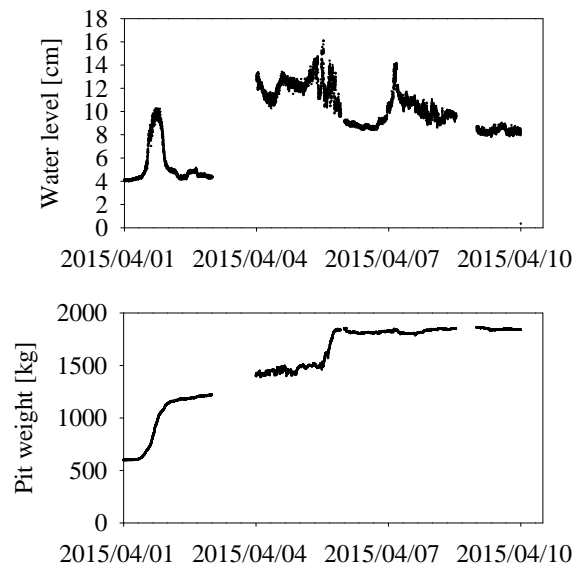


Fig. 6 Changes in water level and pit weight

mm/hで、それほど強い降雨ではない。しかしながら、足洗谷流域内に残っていた積雪が気温上昇とこれらの降雨によって融かされることで、融雪水流出が降雨と重なり、河川流量が降雨規模の割には著しく増加し、冬期から春期にかけての凍結融解等によって生産された土砂を伴った土砂移動イベントとなったものと思われる。

##### 4.2 観測結果

###### (1) 水位・ピット重量変動

出水・土砂移動イベントが発生した2015年4月1日から10日にかけて足洗谷観測水路で計測された水位とピット掃流砂計の重量変化をFig. 6に示す。4月3日と8日に欠測期間があり、その間のデータは不明であるが、およそイベント期間中の水位変動と土砂移



動が記録されている。4月1日のイベントでは、一旦水位が上昇した後、元の水位に戻っているが、3日以降の一連の降雨では、無降雨期間中も水位が元のレベルまでは戻らず、融雪に起因する流出が継続しているものと思われる。水位変動と調和して、ピット流砂量計による荷重計測値も変化を示している。特に、1日と5日のイベントにおいて、重量変化が大きく、土砂移動が活発であった事がわかる。6日以降、降雨が継続し、水位変動もみられるにも関わらず重量増加が見られないのは、ピットが満砂したことによるものと思われる。

## (2) 水平・鉛直ハイドロフォン計測値

この期間中に、右岸側に設置した水平・鉛直ハイドロフォンセットによって計測されたパルスおよび音響波形の積分値をFig. 7に示す。図の左列は水平ハイドロフォン、右列は鉛直ハイドロフォンの計測値であり、上段から順に増幅率が1024, 256, 64, 16, 最後に音響波形の積分値を表わしている。これらの計測値は、定量比較ができるように全て単位長さ辺りの検出値に変換されている。

まず、水位変動やピット掃流砂計の重量変動と比較すると、全体として（特に水平ハイドロフォン）計測値が、よく対応していることがわかる。1日の水位変動後に検出値が一旦減少するものの、3日以降の降雨では、ほぼ連続的に検出されている。

次に、水平と鉛直ハイドロフォンの検出値の比較を行う。2章で示した式(2)の仮説に従えば、水平ハイドロフォンでの検出値の方が鉛直ハイドロフォンでの検出値よりも大きくなることが予想される。確かに、増幅率が256以下の場合のパルス数や音響波形の積分値は、その仮説通りの結果が示されているが、増幅率1024の場合はその逆の傾向を示している。これは、1章で触れたように、流砂量が多い場合はパルスの飽和が発生し、パルスが過少に検出されてしまうという問題によるものと思われる。逆に、水平ハイドロフォンでパルスの飽和が発生しているにもかかわらず、鉛直ハイドロフォンでは、検出部位が水深や砂礫の縦断分布によって限定されているため、相対的にパイプに衝突する砂礫数が水平ハイドロフォンに比べて少ないためか、検出値はシャープなピークを示しており、パルスの飽和は発生していないようである。この事は、水平ハイドロフォンでパルスの飽和が発生する様な場合でも、鉛直ハイドロフォンのデータが有効に活用できるという可能性を示している。増幅率が256以下のデータを見たとき、増幅率256でも水平ハイドロフォンに若干のパルスの飽和が発生しているようにも見えるが、1024の場合よりもその程度は小さい。増幅率が小さくなるに従って、鉛直ハイドロフォンの検出値が相対的に小さ

くなっていく傾向が見られるが、これは増幅率が小さくなると検出される砂礫の粒径範囲が大きくなる事から、砂礫濃度の鉛直分布によって、河床に掃流砂が集中するという傾向が顕著になるためと解釈でき、2章での仮説に沿う結果と思われる。このことから、増幅率1024や256の場合は、パルスの飽和にマスクされて明確には表れていないが、粒径が小さな砂礫に対応するパルスは、水平・鉛直ハイドロフォンの検出パルスは相対的に差が小さくなる傾向を示している可能性がある。

更に検討するため、式(3)、(5)で示した水平・鉛直の検出比率 $R_{hr}$ を計算し、Fig. 8に示す。全体として $R_{hr}$ の値が砂礫検知数の変動に伴って変動しており、一定値ではない事が示されている。その変動範囲は概ね $0.0 < R_{hr} < 1.0$ に入っており、4章で示した仮説の範囲内である。しかし、増幅率1024の3日以降の値と増幅率256の7日以降の値では、1.0を大きく上回る値が算出されている。これは、上述の通り、水平ハイドロフォンにおけるパルスの飽和が起こったためと考えられるが、この影響も含めた $R_{hr}$ の値として以降の解析に用いることで、パルスの飽和问题を解消できる可能性が示されている。ただし、増幅率16まで増幅率を下げると、鉛直ハイドロフォンで検出できる砂礫個数が十分な数でなくなるためか、データとしてまばらな分散を示している。

## (3) 鉛直分布を考慮した掃流砂量に関する検討

水平ハイドロフォンによる検出値と水平・鉛直ハイドロフォンの検出比率 $R_{hr}$ を用いて、式(4)および(6)から、水平ハイドロフォン上の全流水断面を通過する砂礫の仮想的な総検出量を算出し、Fig. 9に示す。ここで、水平パイプ検知高さ $H_p$ は、パイプ径0.05 mの1/3円周が露出していることから、 $H_p = 0.0125$  mとしている。やはり、増幅率16の場合は、鉛直ハイドロフォンによって検出される砂礫パルスが十分でないことから、連続的にパルスが発生する様な結果とはなっておらず、解析には適さないデータであると判断される。一方、増幅率1024, 256の場合は、連続的に変動するパルスが算出されており、水平ハイドロフォンによって検出されたパルス(Fig. 7)と比較すると、それよりも大きな値が示されており、水平ハイドロフォンに衝突せずにパイプ上を通過した砂礫についても含まれた検出値となっていることが示されている。特に、増幅率1024の場合、最大でおよそ40倍、256の場合およそ10倍の検出値となっており、水平ハイドロフォンだけでは取り逃がしてしまう砂礫通過量が多量に捕捉されている事がわかる。この要因としては、上述の通り水平ハイドロフォンにおけるパルスの飽和により、実際には衝突

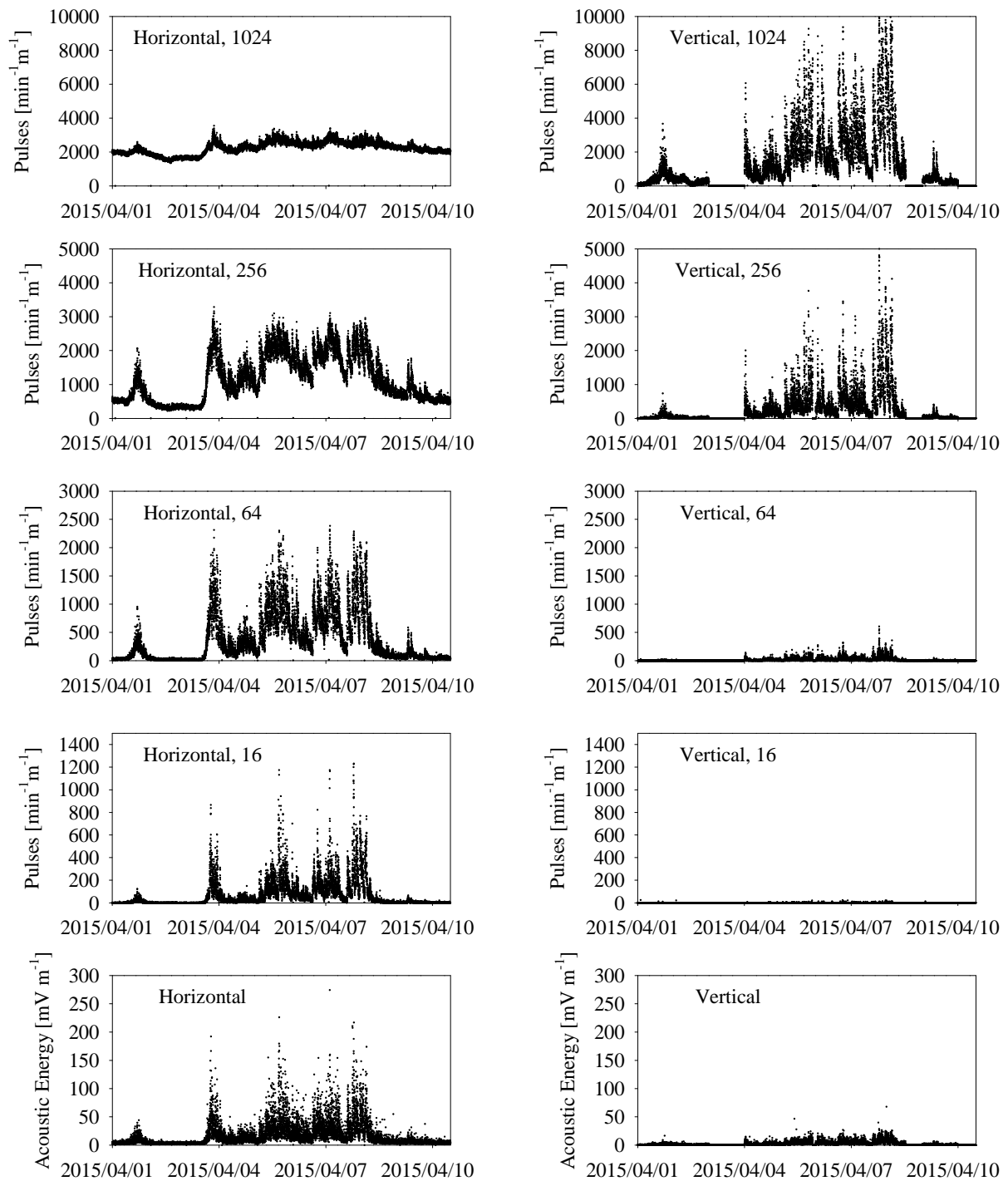


Fig. 7 Observed pulses and acoustic energy by the horizontal and vertical hydrophones

している砂礫が飽和によって検出されていない分のパルスを、鉛直ハイドロフォンによる検出で補っている ( $R_{hv}$ に包含) という事と、2章での仮説通り、粒径の小さな砂礫の場合 (増幅率が大きい場合)、より多く河床面から遊離して通過している事が挙げられる。これら二つの要因を定量的に分離すること

はできないが、それらの相互作用として通過砂礫の総量が算出されている事が示されている。しかし、増幅率64の場合は、水平ハイドロフォンの検出値と比べて、4月8日に大きな値を示しているものの、全体としては同等か、逆に小さな値を示している。このことから考えると、砂礫移動の偏流等により、水

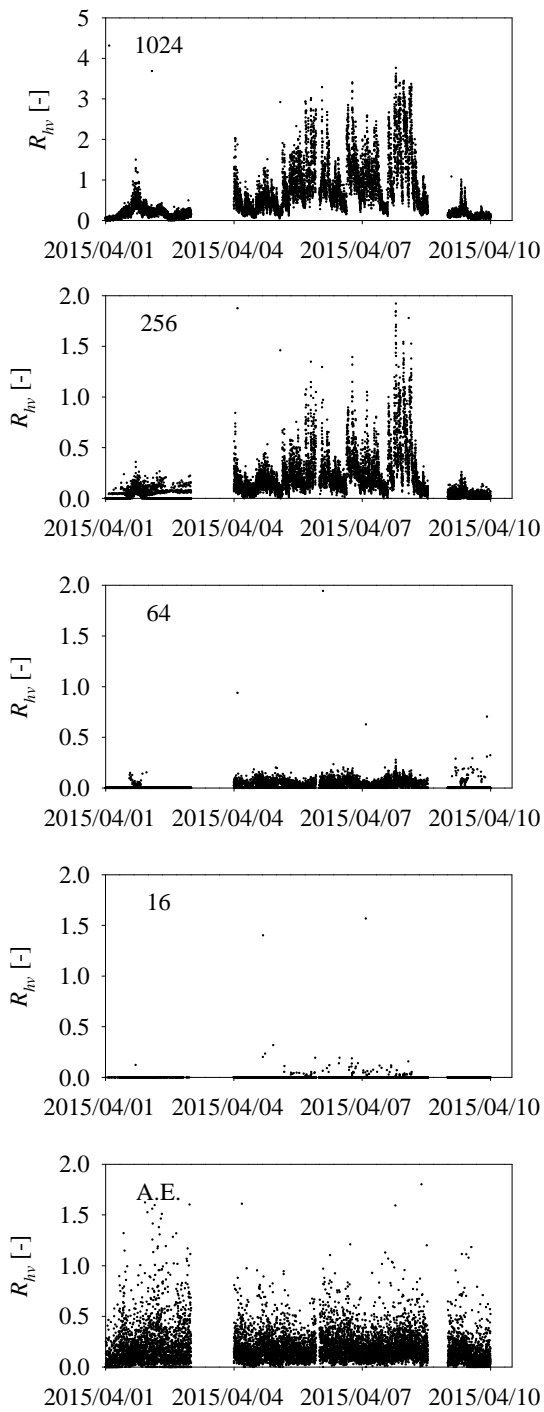


Fig. 8 Measurement ratio by horizontal and vertical hydrophones

平方方向の分布が生じており、鉛直ハイドロフォンに相対的に衝突し難い状態が生じている可能性が考えられる。このため理想的に鉛直ハイドロフォンに衝突する場合の $R_{hv}$ よりも実際には小さな $R_{hv}$ が算出されそれによって、仮想的な総量 $P_i$ が小さく算出されている事によるものと想定できる。音響波形の積分は、水平ハイドロフォン検出値よりも若干大きめの

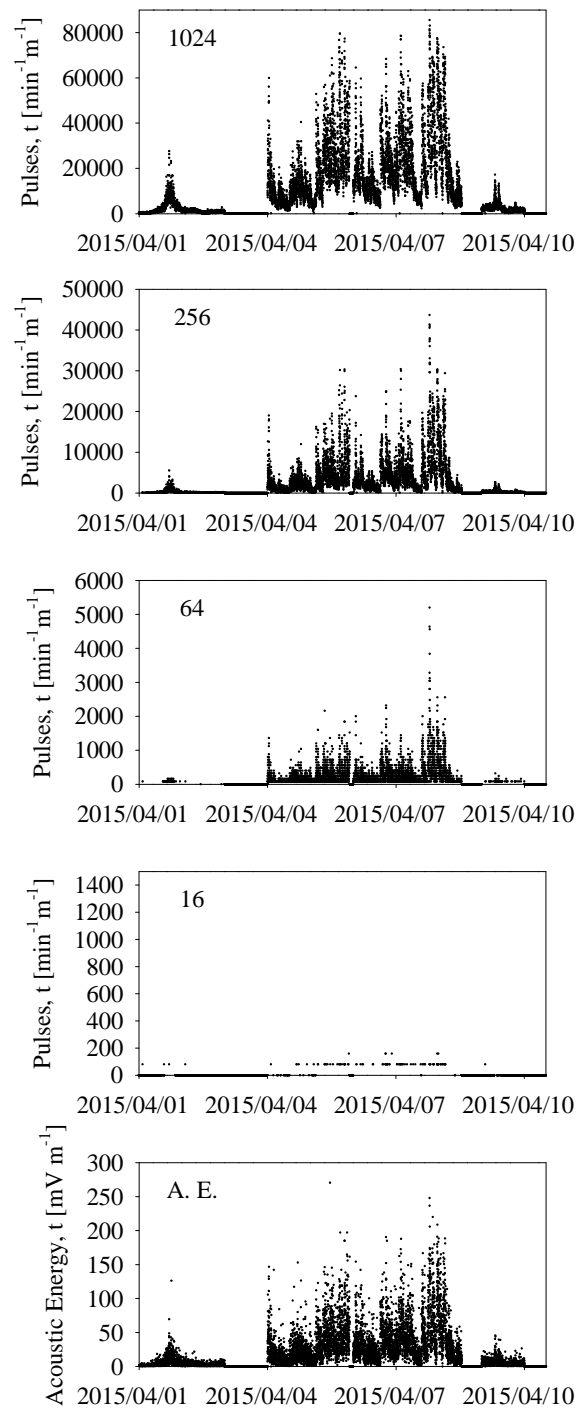


Fig. 9 Hypothetical total detection by horizontal hydrophone, corrected by vertical measurement

値を示している。

ここで示した、仮想的な通過砂礫の総量検出値が正しいと仮定して、実際に水平ハイドロフォンで検出されている割合（検出率 $DR$ ）を算出し、Fig. 10に示す。増幅率が1024、256の場合、 $DR$ の値が1.0以下の範囲に多く集中しており、小粒径の砂礫の場合は、水平ハイドロフォンによる検出率が低下する事が示



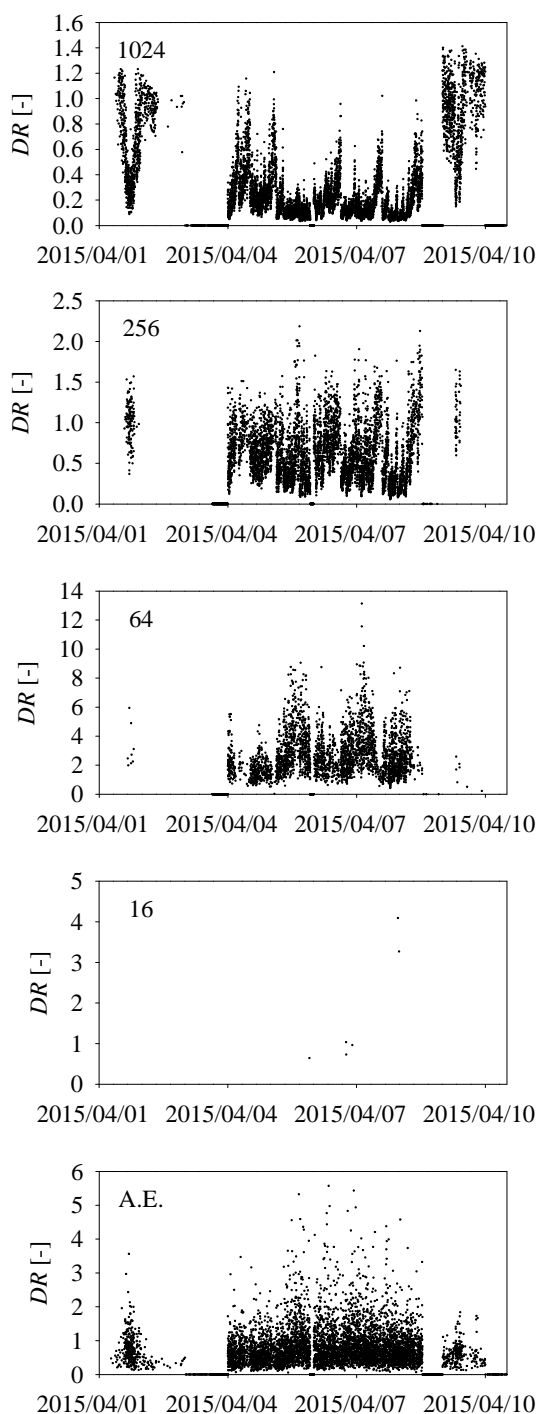


Fig. 10 Detection rate of sediment by the horizontal hydrophone

されおり、更にこれは水位が上昇し、土砂移動が活発になるに従って低下する事が表れている。しかしながら、この原因を、パルスの飽和による原因と、パイプに衝突せずに通過する砂礫の割合が多くなるためである原因に定量的に区分することはできない。一方、増幅率64の場合は、検出率 $DR$ が多数1.0を超え、仮想的な通過総量よりも水平ハイドロフォンに検出

される量の方が多いという矛盾が表れている。この原因は、上述の通り粒径が大きくなるに従って、移動砂礫の水平方向の偏流等により、鉛直ハイドロフォンに衝突し難いという傾向が表れるためと考えられる。増幅率16の場合は、データ数が十分でなく、明確な傾向を見ることができない。音響波形の積分値に関してみると、 $DR$ が1.0を超えるデータも見られるが、平均的には1.0よりも小さな値に集中しており正常範囲のデータととらえることができる。音響波形の積分値は、全粒径の砂礫衝突を代表しており、かつパルスの飽和の問題も排除して考えられることから、有用なデータであると考えられる。

#### (4) ハイドロフォン検出値とピット流砂量のキャリブレーション

最後に、ハイドロフォンによる検出値と直接計測による掃流砂量とのキャリブレーションを行う。Fig. 11に、4月1日から2日にかけての土砂移動イベントにおける水位変動とピット流砂量計の荷重変動量とその差分値として求めた掃流砂量、さらにピット流砂量計の直上流に設置されている既存のハイドロフォンによる計測値を左列に、水平・鉛直ハイドロフォン検出値から求めた水平・鉛直比率 $R_{hv}$ を用いて式(4)、(6)で既存ハイドロフォンの計測値を補正した総検出値を右列に示す。図において、水位変動以外は、微小な時間的ばらつきを除去するために、30 minの移動平均をとってプロットしている。

ピット流砂量計によって計測された流砂量の変動を見ると、細かな増減を繰り返しながら、全体としては水位変動の増加・減少に従った変動を示している。それに対して、ハイドロフォンによって検出されたパルス値と音響波形の積分値も、増幅率によって量的な違いがあるものの、掃流砂量の変動に近似した変動を示している。しかし、増幅率1024、256のパルス値は、掃流砂量変動と比較して、なだらかな変動を示しており、各ピークがはっきりしない傾向を示している。一方、水平・鉛直比率 $R_{hv}$ を用いて補正した総検出値を見ると、補正前はピークがなだらからであった増幅率1024、256のパルスが増加し、その変動が掃流砂量の変動にさらに近似する傾向となった。増幅率64、16の場合は、補正することでかえって小さくなり、変動も異なる傾向を示している。音響波形の場合、およそ2倍程度増加し、変動に関してもややピークが明瞭となる傾向を示している。

ピット流砂量計で計測された掃流砂量を横軸に、既存ハイドロフォンにて計測された検出値を縦軸にとり、キャリブレーション関係をFig. 12, 13に示す。図において、既存ハイドロフォンによる検出値を左列、水平・鉛直比率 $R_{hv}$ によって補正された総検出値を右列に示している。Fig. 11に示された傾向のとお

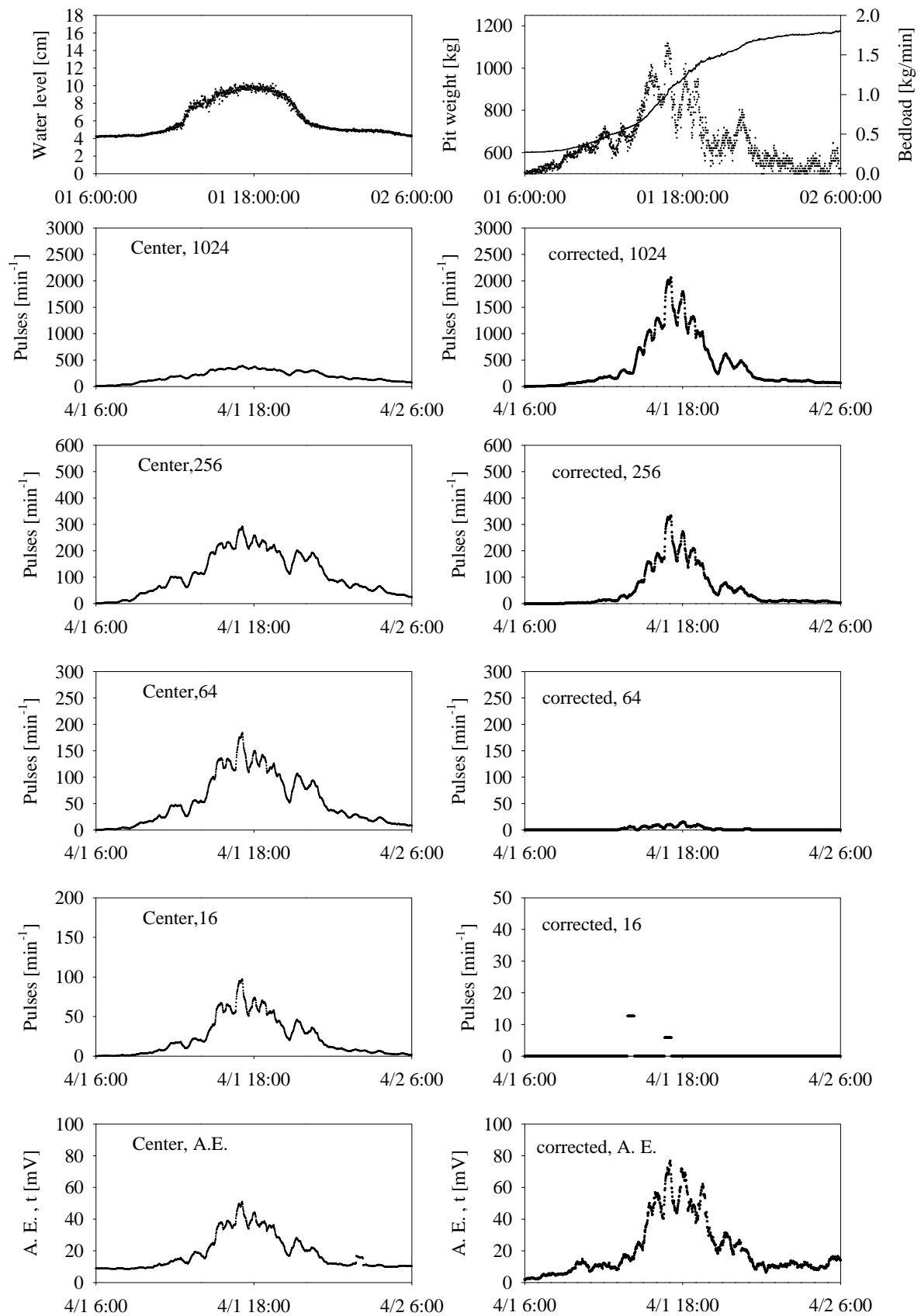


Fig. 11 Changes in water level, bedload discharge, measured and corrected pulses (acoustic energy) by horizontal hydrophone from 1 - 2 April, 2015

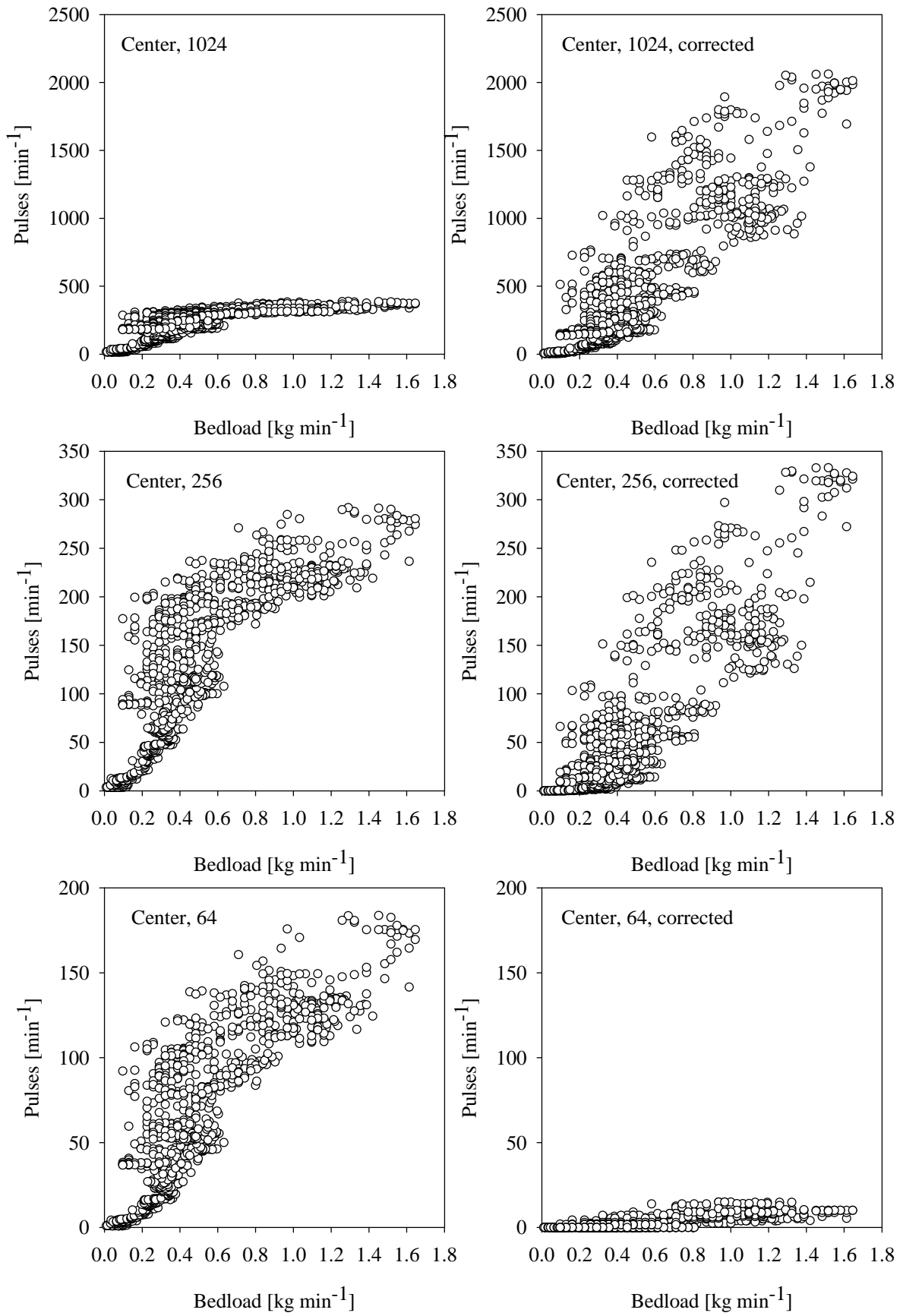


Fig. 12 Correlation between bedload discharge and hydrophone pulses (left column: detected by the horizontal hydrophone, right column: corrected by vertical hydrophone)

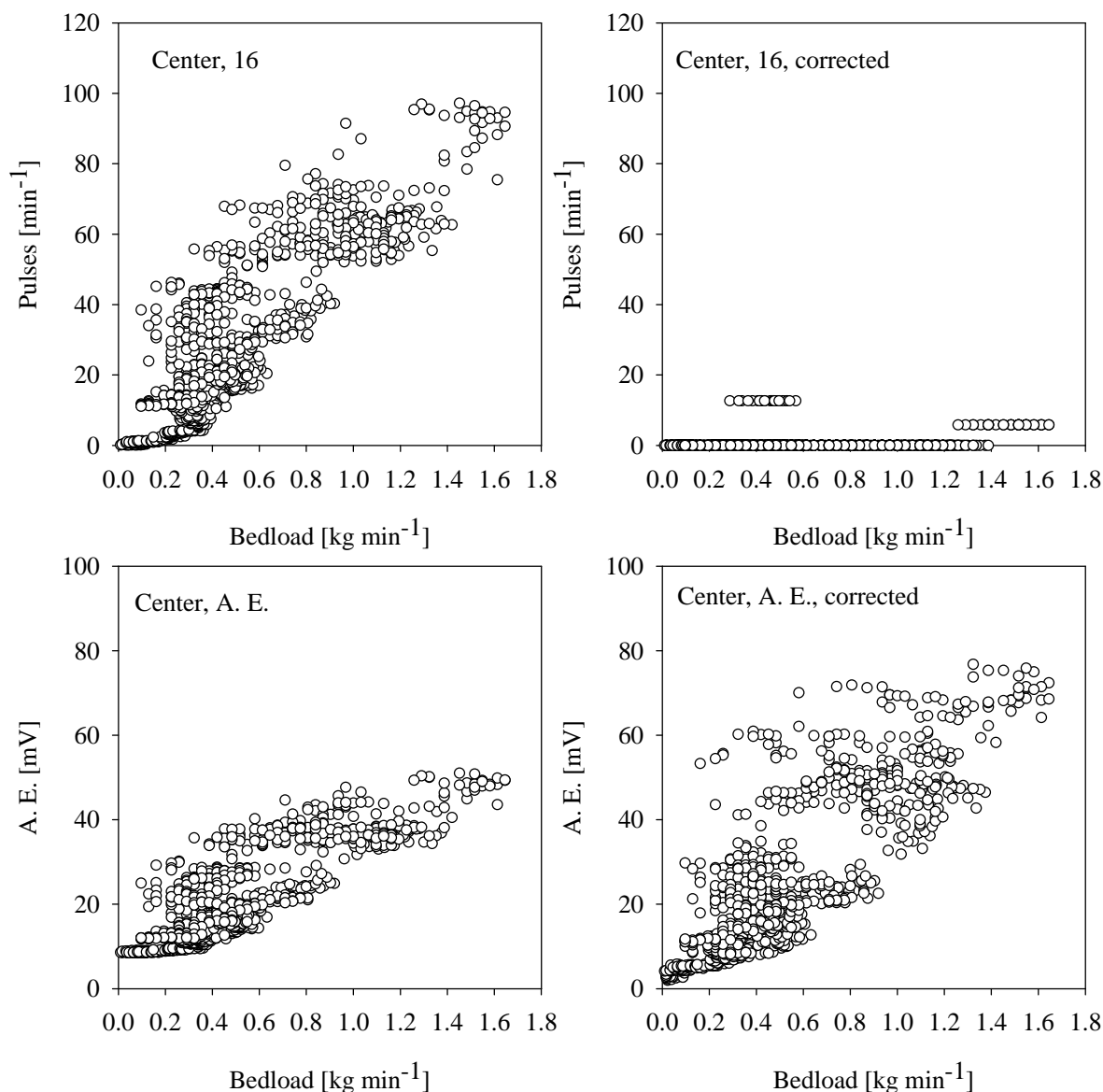


Fig. 13 Correlation between bedload discharge and hydrophone pulses or acoustic energy (left column: detected by the horizontal hydrophone, right column: corrected by vertical hydrophone)

り、増幅率1024、256の場合は、補正前のキャリブレーション関係は、掃流砂量が大きくなるに従って傾きが小さくなり、線形の関係を示していないが、 $R_{hv}$ によって補正した総検出値は掃流砂量が大きくなっても傾きが減少せず、全体として線形関係を示しており、良好なキャリブレーション関係が得られている。増幅率64、16の場合は、補正することでかえってパルス数が減少する結果となり、キャリブレーション線としては適当でないことを示している。音響波形の積分値については、補正後のキャリブレーション関係は、補正前とデータのばらつきや線形傾向はほぼ同じであるが、傾きが補正前に比べておよそ2倍程度増加している。このことは、河床に設置したハイドロフォンパイプに衝突せずに通過した砂礫を

も含めた総検出値が適切に評価されている可能性を示している。

以上のことから、ハイドロフォン計測から掃流砂量を算出する目的に対して、増幅率1024や256のような大きな増幅率のパルス値か音響波形の積分値を水平・鉛直比率 $R_{hv}$ で補正した総検出値に関するキャリブレーション関係を用いることが有効であると判断できる。これらのキャリブレーション関係は、小粒径の掃流砂量の算出に特に有効であると言える。水平・鉛直ハイドロフォンセットによる計測を実施することで、水平・鉛直比率を算出し、補正に用いることで、これまでは流砂量の多い状況ではパルスの飽和によって計測ができなかった高増幅率のパルスデータが有効に活用できるようになるという利点や、

ハイドロフォンパイプに衝突せずに通過している砂礫をも含めた総流砂量が推定されうる可能性が示された。

## 5. おわりに

本研究では、従来通りの河床に水平に設置するハイドロフォンに加えて、新たに河床に対して鉛直に水路壁面に設置するハイドロフォンを加えた掃流砂観測手法を提案した。これら、水平・鉛直ハイドロフォンセットにより、掃流砂の鉛直分布を考慮した計測を試みた。

実際に、足洗谷観測水路に水平・鉛直ハイドロフォンセットを新設し、現地実験と現地観測を実施した。当初の仮説では、水平と鉛直ハイドロフォン計測の比をとることで、鉛直方向に生じている砂礫濃度分布による検出量の減少率が算定され、その結果を用いて、仮想的な総検出量が推定できるとしていた。実際の観測では、水平ハイドロフォン計測において、パルスの飽和が発生し、水平と鉛直ハイドロフォン検出比には、その影響が濃く反映される結果となった。このため、砂礫濃度の鉛直分布による効果とパルスの飽和による効果を分離することはできないが、両者の影響を含んだ水平・鉛直検出比が算出され、その値による水平ハイドロフォンの補正值（流水断面を通過する仮想的な総検出値）が検出される結果となった。これらの結果と、ピット流砂量計による掃流砂量とのキャリブレーション関係は、補正しない検出値よりも、線形関係が明確となり、有効なデータであることが示された。特に、増幅率1024, 256の場合のパルスや音響波形の積分値を、ハイドロフォン検出値から掃流砂量への変換に用いることが有効である。

現地観測の解析では、融雪型の出水イベントを対象としたが、豪雨に起因する大規模な出水・土砂移動イベントで、はたして同様の解析が可能かは不明であり、特に鉛直ハイドロフォンにパルスの飽和が発生しないかという事は保証されておらず、検証が必要である。また、異なる出水イベント毎のキャリブレーション関係の比較も必要となり、今後の継続的な現地観測が必要である。増幅率が小さなパルスの検出値において、鉛直ハイドロフォンに砂礫が衝突し難い影響が推察されたが、現地観測においてこの事象についてもさらなる検討を行う必要がある。今後、補完的な計測や理論的な考察を加えて、鉛直方向の砂礫濃度分布がハイドロフォン計測結果に与える影響検証を行い、更に精度の高い、掃流砂観測を進める。

## 謝 辞

本研究は、一般財団法人砂防・地すべり技術センターの平成26年度研究開発助成による研究課題として実施しました。ここに記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智・平澤良輔・長谷川祐治 (2010) : 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究, 砂防学会誌, 62(5), pp. 18-26.
- 堤大三・野中理伸・水山高久・志田正雄・市田児太郎・宮田秀介・藤田正治 (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, 56B, pp. 465-471.
- 富田邦裕・藤田正治・堤大三・叶 正興・重村一馬 (2015) : ハイドロフォンデータを用いた上流域の土砂流出状況の評価手法に関する提案, 平成27年度砂防学会研究発表会要旨集, A-128.
- 三上幸三・吉村明・工藤裕之・長山孝彦・田方智・松岡 暁・伊藤隆郭・水山高久・宮本邦明・藤田正治 (2012) : 常願寺川における 2011 年 7 月 11 日のフラッシュフラッドと縦断的な流砂観測, 平成24年度砂防学会研究発表会要旨集, pp. 510-511.
- 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.
- 水山高久・松岡美和・野中理伸 (2008) : 流砂量の多い状態のハイドロフォンによる流砂計測 (音圧データの取得), 砂防学会誌, 61(1), pp. 35-38.
- 叶正興・藤田正治・堤大三・内田太郎・光永健男・守谷武史・渡辺正彦・富田邦裕 (2015) : 大武川におけるハイドロフォンを用いた流砂量観測とその評価, 平成27年度砂防学会研究発表会要旨集, A-126.
- 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., Turowski J.M., Fritschi B., Wyss C., Laronne J., Barzilai R., Reid I., Kreisler A., Aigner J., Seitz H. and Habersack H. (2014) : Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, pp. 928-942.

(論文受理日 : 2015年6月11日)