

衝突音を利用した礫河川の小規模洪水時の 掃流砂観測手法の開発

BED-LOAD MEASUREMENT DURING SMALL SIZED FLOOD IN GRAVEL-BED RIVER

椿 涼太¹・坪下健太郎²・河原能久³

Ryota TSUBAKI, Kentaro TSUBOSHITA and Yoshihisa KAWAHARA

¹ 正会員 博(工) 広島大学助教 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² 学生会員 広島大学大学院工学研究科 (同上)

³ フェロー会員 工博 広島大学教授 工学研究科 (同上)

A method to detect an amount and size of bed-load in a gravel-bed river was proposed. This method was designed for measuring the sediment transport during relatively small flood. A detecting device was composed by a steel shell, sound recorder and base weight. The diameter of this device was comparable to the representative size of the bed materials in riffles. A procedure to estimate the size and impinging velocity of sediment particles was developed. The devices were used in a gravel-bed river during the flushing flow and validity of the proposed concept was proved. Controversial points were discussed and improvement plans were discussed.

Key Words: Bed-load monitoring, hydrophone, gravel-bed river, small sized flood, impact sound

1. はじめに

ダム下流の河川環境の制御や改善を狙う手段の一つとして、平水時にダムから人為的にまとまった放流を行うフラッシュ放流が実施されている。河川環境への影響の程度は、放流波形や置き砂の方法などにより大きく変化するため、河床礫の移動や過剰な水草等の一掃などの効果を狙う場合、放流の実施方法を適切に設計する必要があるが、放流中に変化する土砂や物質の移動の実態は、実用的な実測が困難なこともあって十分に把握できていない面が多い。そのため放流の効果がプロセスベースで評価できておらず、放流波形の設定が最適であるかを判断できていない。そこで、本研究ではフラッシュ放流の及ぼす河川環境への影響分析を行う上で重要な要素の一つである、河床礫の移動の時間特性を把握するための技術開発を行うこととした。

2. 既往研究と本研究の特徴

本章では、まず既往の掃流砂の観測技術を概観し、次に球が衝突した際の平板の振動理論を解説する。続いて、本研究で開発する観測手法や機器構成を説明する。

(1) 掃流砂の計測技術

河床に測定機器を設置して掃流砂を直接観測する方法は、これまで様々な提案がなされている。

澤井ら¹⁾や水山ら²⁾は、金属パイプを利用した掃流砂観測を行っている。これは、マイクロフォンを収容

した金属パイプを、水流と直交するように寝かせた状態で、水中に半身を露出させるようにして河床に埋設するものである。流砂の粒が金属パイプに当たり発生する音を解析し、流砂量を算定している。金属パイプを用いる方法は、主に山地河川での多くの観測実績があり、分析方法の改善も続けられている^{3,4)}。一方で、大きなパイプを固定するための設置作業が大掛かりになり、測定位置周辺の河床の状態が変わってしまう欠点を有する。

パイプではなく平板を用いる掃流砂の計測法も提案されている。小田・境⁵⁾では粒径の判別法を提案している。また桑村ら⁶⁾では、実験用水路の底面および橋脚状の構造の上流部に流れに垂直にステンレス板を設置し、音圧センサーによる衝突の計測を行っている。平板を用いる方法においても、装置がまくり上がらないよう、河床に固定させる必要がある。また、機器一式を敷設するに伴い河床の状態も変わることとなり、また金属板の上に土砂が積もれば測定にも影響する。

上記の音響特性を利用するものの他に、機材を水面上から懸垂したり、水路内にピットなどを設けて、機械的に掃流砂を採取する方法もあるが、連続的に多値点での土砂移動特性を計測する上では、費用や人手の面で課題を有する。

(2) 衝突音に関する既往研究の分析

平板に対する球の衝突について、五十嵐らが実験および理論分析を行っている⁷⁾。平板は鋼板を用いてお

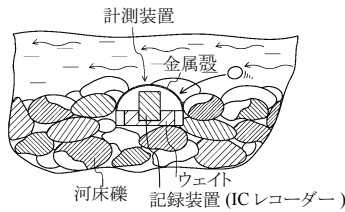


図-1 計測装置の配置

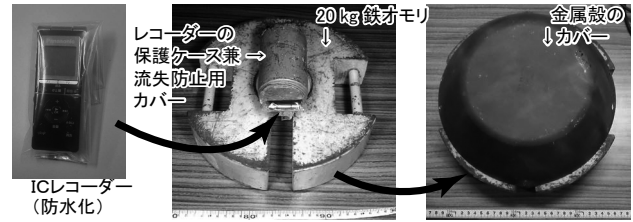


図-2 計測装置の実際の構成

り、衝突球はナイロン、ゴム、プラスチック、鋼製のものを用いている。室内での衝突について、フォーストランスデューサーによる衝突力とマイクロフォンによる衝突音の波形を分析しており、衝突音のピーク音圧は、インパクト力と比例し、また衝突物体が同じであれば、ピーク音圧は衝突速度の6/5乗にほぼ比例し、インパクト時の波の周期(定義は図-3に示す)は衝突速度の-1/5乗にほぼ比例することが確認されている⁷⁾。また実験で同定された衝突条件と波形の対応関係を表すべき乗則は、Hertz および Zener の衝突理論と対応していることが報告されている。

Hertz の弾性球の衝突理論では⁷⁾、インパクト時の衝突力 F は

$$F = \alpha m^{3/5} v^{6/5} \quad (1)$$

と表される。ここに、 α : 材料特性による係数、 m : 衝突粒子の質量、 v : 衝突速度である。 α は衝突粒子の半径にも依存するため、結果として質量も影響する。 α に含まれる半径の効果を、衝突粒子の形状を球と見なし、質量に換算して m の指数にまとめると、

$$F = \alpha' m^{2/3} v^{6/5} \quad (2)$$

となる。またインパクト周期 T は、

$$T = \beta m^{1/3} v^{-1/5} \quad (3)$$

と表される。式(2)、式(3)より、 v および m をそれぞれ F および T で表すと、

$$v = \gamma F^{5/8} T^{-5/4}, \quad (4)$$

$$m = \delta F^{3/8} T^{9/4} \quad (5)$$

となる。ここで β, γ, δ は材料特性に依存する係数である。

(3) 本研究で開発する観測手法の構成

本研究では、上記の既往技術や知見を踏まえつつ、出水規模が限定されるフラッシュ放流中の土砂動態を把握することを目的として、比較的観測が容易で安価に実施できる実用的な掃流砂計測方法の開発を行う。掃流砂の総量を捉えるというよりは、土砂移動の時空間的な違いや、付着藻類の剥離や水草の流失に及ぼす砂礫移動の効果の分析に用いることを念頭に置いている。

本研究では、人力で設置可能かつ配線等の必要のない独立型の掃流砂計測装置を設計した。この装置は、図-1

に示すように河床礫の間に設置されるウェイトと、その上に一体的に取り付けられる金属殻、装置内部に設置する IC レコーダーにより構成される。殻状のカバーは設置河道の代表的な河床材料に合わせたサイズや形状とし、上端の高さは、周囲の河床材料の起伏に合うように設置した。ウェイトを用いて、装置の重さが、周囲の代表的な河床材料の2倍程度になるように調整した。このことにより、計測装置の移動を防ぎ、また流失したとしても、設置位置の近傍で装置を回収できるようにした。

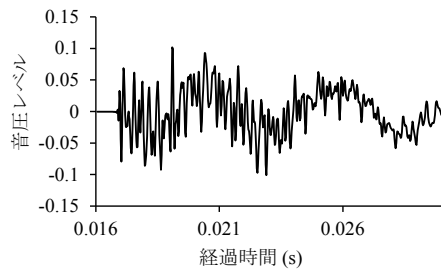
具体的な機器構成を図-2に示す。金属殻の内部に、衝突音を記録する IC レコーダーを設置する。IC レコーダーはステレオの PCM 形式で 44.1kHz の記録が可能な Panasonic 製 RR-XS450 を用いた。利用した IC レコーダー自体は防水型ではないため、0.05mm 厚のポリエチレンシートをシーラーで二重に封印し、これをジップロックで包んだ。

電池持続時間はカタログ上ではアルカリ乾電池を用いて約 27 時間となっているが、著者等が室内・室温で行った連続録音試験では約 20 時間の録音が可能であり、温度が低い場合には、さらに録音時間が減少した。IC レコーダーの音圧感度は十分であり、計測に際しては録音レベルを低感度モードのレベル 4 に固定した。

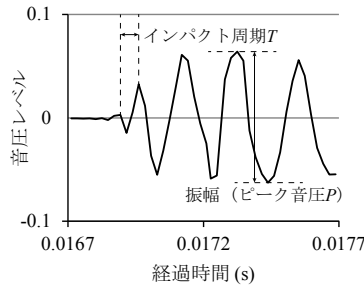
IC レコーダーは鉛製の保護ケースに組み込み装置内に固定した。河床全体が移動する程度の出水では、計測装置自体が流失し、またウェイトと金属殻が大礫の衝突により破損したり分離したりする可能性がある。このような場合でも鉛製の保護ケースにより IC レコーダーが守られて、出水後に回収できることを狙ったが、結果としてフラッシュ放流中の流失や破壊は起きなかった。

金属殻はドーム形をしていて、礫等が堆積し難くなっているため、衝突音を安定して計測でき、掃流砂を精度良く観測することができる。人手で扱える大きさおよび重量であるため、利便性に優れ、大型のハイドロフォン観測装置に比べると複数の砂礫が同時に衝突する確率が小さく、横断測線に沿って多数配置するなどの計測が可能である。

図-3に、一回の衝突により生じる衝突音の記録音波形の例を示す。衝突音の記録波形は、初期の周期と振幅の小さいインパクト部分に続き、やや周期が長く振幅が大きくなる波形が 0.002 s 程度続き、衝突開始から 0.002 s 程度以降には、250 Hz 程度の長周期の変動に替



(a) 衝突音から固有振動への変遷



(b) 衝突初期の波形とインパクト周期 T
およびピーク音圧 P の定義

図-3 単一衝突による衝突音波形の例と波長の定義

わって減衰していく。インパクトから 1/100 程度まで減衰する時間は 0.2 s 程度である。

3. 計測装置のキャリブレーション

本章では、砂礫が金属殻に衝突した際に生じる振動音の計測値から、衝突した砂礫の大きさや衝突速度を推定する方法を検討するために行った予備実験の方法と結果を述べる。まず粒子形状が均一なガラスビーズを用いて、衝突条件や金属殻の違いによる衝突音の関係を確認する。次に、自然礫を用いた衝突実験の音圧波形から、衝突粒子の粒径の判別を行う。

(1) ガラスビーズを用いた衝突条件と音圧の関係の整理

a) 実験方法

20 kg の鉄製のオモリに、防水化した IC レコーダーを設置し、その上部を 3 種の鉄製の金属殻（フライパンを転用）で覆い、装置一式をガラス水槽中に沈めた。金属殻は 3 種の大きさのものを用意したが、これは現地計測における上流部と下流部での代表粒径の違いに合わせて配置することを踏まえたものである。金属殻の大きさは、直径 27.5 cm/高さ 7.5 cm、直径 26.5 cm/高さ 7.0 cm、直径 20.5 cm/高さ 8.0 cm であり、それぞれ L, M, S と区別する。金属殻に質量が 35.47 g, 9.87 g, 2.51 g, 0.16 g のガラスビーズを衝突させた。記録される波形の振幅は、音圧 (Pa) に比例したものであるが、Pa 値への換算は行っておらず、本論文では音圧を最大 ± 1 のレンジを持つ次元なしの数字で表示する。衝突の様子は水槽側面からカメラ (Casio 製 EX-ZR200) により

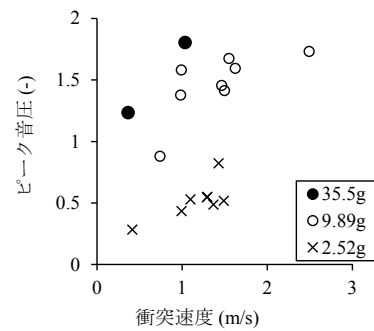


図-4 ガラスビーズの質量の違いによる衝突速度とピーク音圧の関係

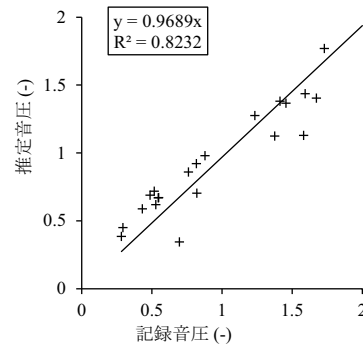


図-5 衝突条件 m および v により算定したピーク音圧と録音音圧の比較

480 FPS で録画し、粒子の衝突速度を算出した。まず、金属殻を固定して、ガラスビーズの落下開始の高さを変化させることで衝突速度を変化させて、衝突速度および衝突粒子質量と、記録音圧の関係を確認した。次に、金属殻の違いによる音圧違いを把握するため、落下開始の高さを一定として、ガラスビーズの質量と金属殻の組み合わせを変えたケース毎に 5 回ずつ衝突を行った。

b) 実験結果

図-4 に、ガラスビーズの質量と衝突速度の違いによるピーク音圧の変化を確認する。衝突粒子の質量が大きいほど、また衝突速度が大きいほどピーク音圧が大きい。そこで、衝突粒子の質量 m (g) および衝突速度 v (m/s) のべき関数によりピーク音圧 P の大きさを予測することを考え、最小二乗誤差が小さくなるように係数を同定したところ次式を得た。

$$P = 0.380m^{0.477}v^{0.488} \quad (6)$$

上式で算定されるピーク音圧と、IC レコーダーにより記録されたピーク音圧を図-5 で比較する。多少のばらつきはあるが $R^2 = 0.82$ と概ね良い相関が得られている。衝突理論では衝突力が式 (2) により評価される。また、空気中であるが、五十嵐ら⁷⁾によれば衝突力とピーク音圧に比例関係が認められている。そこで、式 (2) の指数を固定したまま、比例係数 α' にあたる係数を実験

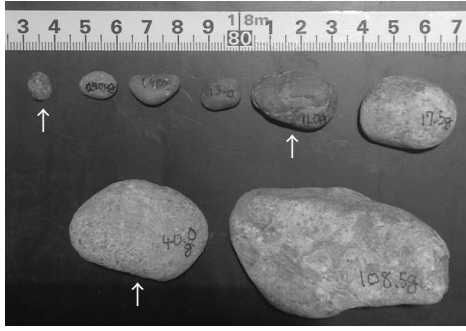


図-6 実験に用いた礫 (白矢印で示した 3 つを使用)

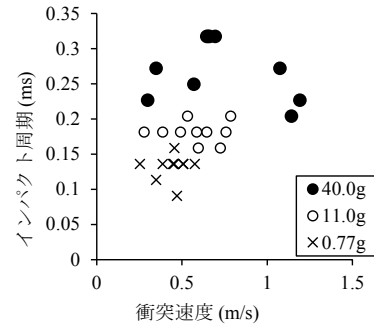


図-7 質量毎の衝突速度とインパクト周期の関係

データで同定したところ,

$$P = 0.187m^{2/3}v^{6/5} \quad (7)$$

が得られ, 決定係数は $R^2 = 0.71$ となった. 式 (6) と式 (7) では特に v の指数に 2 倍以上の差があり, これは水中での音波の伝搬による影響などが原因で生じた可能性があるが, 具体的な原因の特定はできていない. 以下では, 取り敢えず再現性の良い式 (6) を利用することとし, 金属殻の違いによるピーク音圧の関係を分析する.

(2) 自然礫を用いた粒径と衝突速度の判別

a) 実験方法

ガラスビーズの実験と同様に, 防水化した IC レコーダーを内部に配置した金属殻を水槽の底面に設置して, その上方から質量 40.0 g, 11.0 g, 0.77 g の礫を落下させた. 実験に用いた礫を図-6 に示す. 実河川への適用を念頭に, 礫は一般的に河道でみられる程度の形状のばらつきを有する. 落下開始の高さを変えることで衝突速度を変化させ, それぞれの質量の礫を 10 回落下させ, 計 30 セットのデータを取得した.

b) 実験結果

図-7 に礫毎の衝突速度とインパクト周期の関係を示す. 礫の質量が大きいほど周期が長くなっているが, 衝突速度のはっきりした傾向は認められない. インパクト周期は 0.2 ms のオーダーであるが, 44.1kHz の録音では波形の分解能が 0.02 ms となり, 衝突条件によるインパクト周期の違いを分析する上では時間分解能が十分ではない.

以上を踏まえ, 現地観測で記録される衝突音波形から, 衝突礫の質量 m と衝突速度 v を見積もる方法を検討する. まず衝突礫の質量 m の見積もりについて, 衝突波形のインパクト周期 T およびピーク音圧 P を用いてべき関数で表し, 二乗誤差が最小となる係数を同定したところ,

$$m = 329P^{0.845}T^{0.644} \quad (8)$$

が得られ, 標準偏差は $\sigma = 5.15g$ であった. また T の

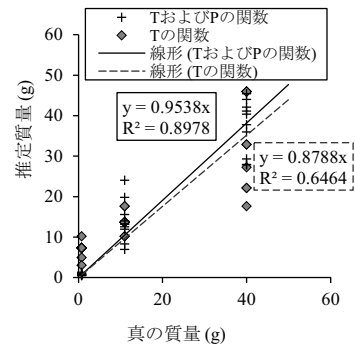


図-8 衝突波形のインパクト周期 T およびピーク音圧 P による衝突礫の質量の推定

みを使って m を評価した場合,

$$m = 554T^{2.17} \quad (9)$$

となり, 標準偏差は $\sigma = 8.34g$ となった. 質量の真値と推定値の関係を図-8 にプロットした. 同図から, P や T を用いて, 高精度とは言えないが大まかな粒径区分はできそうである. 式 (8) は, 式 (9) に比べ説明変数が多いため推定精度が高いが, 理論式である式 (5) の F を P と置き換えて, 式 (8) の指数と見比べると大きく異なっている. 一方, 式 (5) と式 (9) の T の指数は概ね一致しており, 式 (5) における衝突力 F の感度が相対的に小さい (3/8 乗) ことを考えると, 物理的な整合性は式 (9) の方が良いものと推定される. 本実験では自然落下により衝突させたこともあり, 小粒径の粒子について衝突速度の上限が限られることから, 実験条件自体として, 衝突速度と粒径に相関があることも, 式 (8) の指数が物理的な値から大きく外れたことにつながった可能性がある.

記録波形の精度・分解能の限界のもとで検出できる礫の質量と衝突速度を見積もる. 44.1kHz で半波長 (周期 T) を少なくとも 4 分割するためには $T = 0.091ms$ 以上である必要があり, 式 (9) より検出可能な最小粒径は $m > 3.03 g$ 程度となる. また, 音圧レンジの 0.5% 程度まで精度良い波形が記録できると仮定する ($P > 0.01$) と, 衝突実験の結果より, $m = 3.03 g$ では $v > 0.19 m/s$, $m = 10 g$ ($d \approx 1.9 cm$) では $v > 0.11 m/s$ 以上, $m = 100$

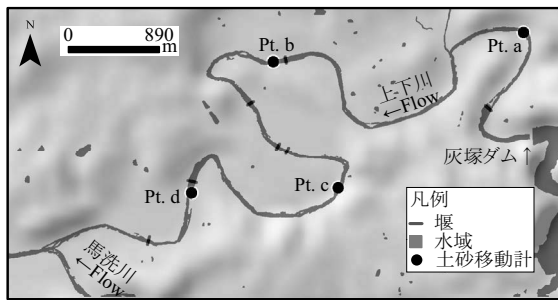


図-9 対象河道区間と調査地点

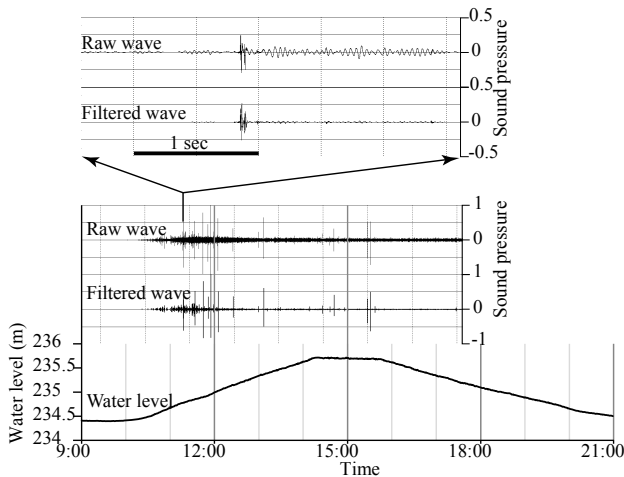


図-10 Pt.a での水位ハイドロと衝突音記録の比較

g ($d \approx 4.2$ cm) では $v > 0.039$ m/s 以上であれば検出可能と見積もられる。

4. フラッシュ放流中の土砂観測への適用

本章では、観測対象であるフラッシュ放流と分析対象の河道区間の概要を述べる。続いて、フラッシュ放流の観測により得られた衝突音の分析に基づき、土砂移動の時間・場所・粒径別の特性を確認する。

(1) 観測の概要

本研究では、2013 年 3 月 21 日に、江の川水系上下川で運用されている灰塚ダムで実施されたフラッシュ放流を対象として、図-9 に示す上下川の灰塚ダムから馬洗川合流地点までの現地観測を行った。ピーク放流量は $100 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、平均年最大流量の 6 割程度に相当する。放流前に、図-9 中の Pt.a~Pt.d に掃流砂計測装置および自記式水位計（応用地質製 S&DL mini 4800）を一つずつ設置した。

(2) 現地観測の結果

図-10 に、Pt.a での水位の変化および掃流砂計測装置で記録された波形を確認する。Pt.a はダムから約 1500m 下流に位置するが、Pt.a の水位波形（図-10 の下段）は

放流波形とほぼ同形状である。記録波形は未加工のもの (Raw wave と表記)、60Hz のハイパスフィルター（音声編集ソフト SoundEngine Free を利用）を適用したもの (Filtered wave と表記) の 2 種類を図-10 の中段に示す。また、記録波形の詳細をみるために水位上昇期の約 3 秒分の記録を図-10 の上部に拡大して示す。ハイパスフィルターの適用により、衝突初期の 0.02 s 程度の高周波が抽出され、水位上昇に伴って発生した連続的かつ低強度の変動が概ね除去されている。連続的かつ低強度の変動は、衝突音の波形とは明らかな違いがあり水流の渦や波等による流水音に起因するものと考えられる。本研究は、粒子の衝突を個別に分析するため、衝突音が重なった場合の分離は現段階では行っていない。一方で、衝突初期にみられ衝突状況の特性が表れる高周波振動の持続時間は 0.02 s 程度に限られ、衝突対象の金属殻のスケールが大きいこともあり、少なくとも観測を行ったフラッシュ放流の記録波形における衝突音は散発的であり、連続的な衝突については大きな課題とはならなかった。

各計測地点で放流中に記録された音圧波形より、衝突音を抽出し、そのピーク音圧 P およびインパクト周期 T を用いて、予備実験で同定した式 (8) より衝突粒子径の質量を推定し、衝突粒子の形状を球と仮定して直径に換算した。その結果を、各計測地点の粒径別・時刻別の衝突回数としてまとめたものを図-11 に示す。同図には、各地点での水位ハイドログラフと、平面 2 次元数値モデルにより評価した局所底面せん断応力が、岩垣式で評価した直径 0.5 cm および 1 cm の単一粒径での限界掃流力を越える時刻も参考として示している。

Pt.a は放流初期に一時的な土砂移動がみられる他は、土砂移動は限定的である。Pt.b は全体的に土砂移動回数が非常に少ない。Pt.c では水位上昇にほぼ比例する形で土砂移動がみられる。Pt.d では水位上昇に遅れて主に 1 cm 以下の土砂移動が活発化している。Pt.d は堰直下であり、堰から細粒土砂が越えて流下していることが示唆される。Pt.d に比べ、上流の地点は土砂移動の検出回数が少なくダムや堰による土砂のトラッピングにより小粒径の土砂が少なくなっていることが示唆される。これらの土砂移動の非定常性は、局所的な底面せん断応力だけでは評価できないことが確認できる。

5. おわりに

放流や出水に伴う河川環境システムの変化を分析する上で重要であるが、これまで技術的な問題もあり分析されてこなかった、土砂の粒径別移動量の時空間変化を捉えることができた。これにより、水の流れだけでなく、土砂移動に関連したフラッシュ放流の効果を具体的に検証できるようになった。土砂移動計測については、本研究の計測対象であるフラッシュ放流は実施日時が既知であり、また放流規模が限定的であることから、比較的容易かつ安価に実施可能な掃流砂計測

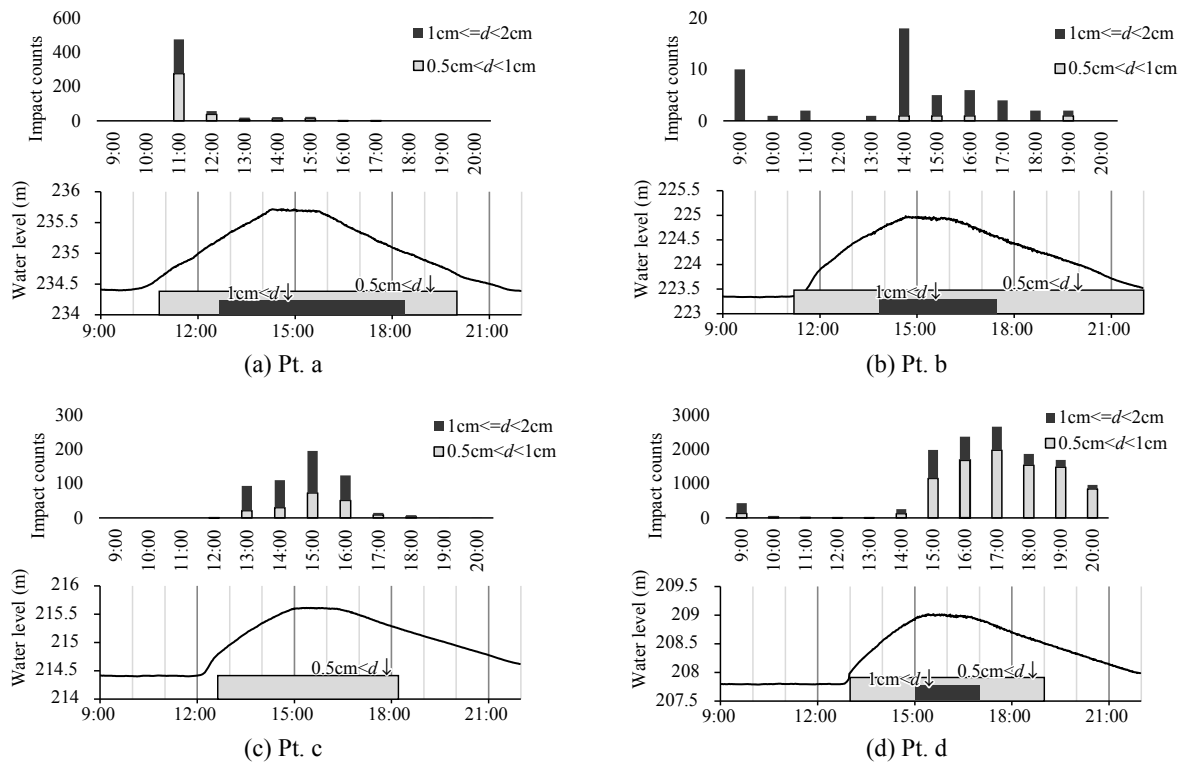


図-11 各計測地点での粒径別・時刻別の衝突回数（棒グラフ），水位ハイドログラフ（折れ線グラフ），数値計算による底面せん断応力が粒径別の限界掃流力を越える時刻（折れ線グラフの下バー）

技術が適用された。

一方で，室内実験と現地観測での条件の違いが，現地観測結果にどの程度影響しているかは十分確認できておらず，より実証的なキャリブレーションや精度検証が必要である．衝突角度，衝突位置の影響とその補正方法については，検討を進める必要である．これらの課題を有することから，本報での現地観測結果は，現状では，定量的な面では参考値と考えている。

その他の課題として，ICレコーダーの防水化にはジップブロック等を用いたが，音波の不安定な減衰や伝搬経路の複雑化をもたらしている可能性があり改善が望ましい．また，インパクト周期を正確に捉える上で，金属殻内部の形状やマイクロフォンの位置・個数の調整が必要と考えている．本研究の範囲内では連続的な衝突による衝突音の重なりは大きな問題とはならなかったが，土砂移動が活発な場合には，衝突音の分離アルゴリズムの導入や，金属殻を分割してそれぞれの小領域での衝突音を個別に記録するなどの対応が効果的と考えられる．インパクト周期の記録について，本研究で用いた録音機器の上限である 44.1kHz では衝突音のインパクトを捉える上で十分ではなく，より高分解能で録音可能な機材を用いることが望ましい．より実用的な技術とするためには，スタンバイ時間や連続計測可能時間を長くすることも必要である。

業，建設環境研究所の皆様にも深く感謝いたします．本研究の一部は，科学研究費補助金，古川技術振興財団，河川整備基金による助成のもとに遂行されました。

参考文献

- 1) 澤井健二, 小倉久直, 板倉安正, 中山純一, 谷口伸一, 澤田豊明, 諏訪浩, 宮本邦明: 可聴音による間接的流砂量測定法（パイプ法）の基礎実験, 昭和 63 年度砂防学会研究発表会, pp. 133-134, 1988.
- 2) 水山高久, 野中理伸, 藤田正治: 成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, Vol. 55, No. 3, pp. 56-59, 2002.
- 3) 小林草平, 竹門康弘, 角哲也, 富阪和秀, 山崎友也, 米田格, 堤大三: ハイドロフォンによるダム流入土砂量把握の高度化に関する研究, 河川技術論文集, Vol. 19, pp. 147-152, 2013.
- 4) T. Uchida, A. Okamoto, S. Hayashi, T. Suzuki, A. Fukumoto, S. Yamashita, and S. Tagata: Hydrophone observations of bedload transport in mountainous rivers of Japan, In *Proc. of the 12th ISRS symposium (Advances in River Sediment Research)*, pp. 1749-1756, 2013.
- 5) 小田晃, 境友昭: 流砂の粒径分布推定方法および粒径分布推定装置, 5 2006, 特開 2007-303847.
- 6) 桑村貴志, 宮藤秀之, 山崎久勝: 音圧を利用した掃流砂観測手法の開発, 水工学論文集, Vol. 46, pp. 631-636, 2002.
- 7) 五十嵐昭男, 後藤誠, 川崎哲: 衝突音に関する研究（第 1 報, 平板に球が衝突する場合）, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 50, No. 453, pp. 840-847, 1984.

謝辞：本研究の遂行にあたりご協力をいただきました，国土交通省中国地方整備局灰塚ダム管理支所，国際航

(2014.4.3 受付)