衝突音を利用した礫河川の 掃流砂観測手法に関する研究

Study on measurement of bed-load in gravel-bed river utilizing digital sound recorder

坪下健太郎¹・椿 涼太²・河原能久³

Kentaro TSUBOSHITA, Ryota TSUBAKI and Yoshihisa KAWAHARA

¹学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会基盤環境工学専攻（〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1）

²正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科社会基盤環境工学専攻（同上）

³フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻（同上）

This paper describes a method of measuring flow rate and size distribution of sediment transported in gravel-bed river during small flood. The device developed is inexpensive, compact and can be installed in the river bed by hand. A steel shell covers the device and impact sound when sediment hits the steel shell is recorded by a digital sound recorder stored in the steel shell. The relationship between sound wave profile and a diameter of the impinged sediment particle was validated based on the result of flume experiment. The proposed method was used to measure processes of sediment transport during a flushing flow released from a dam, then the size distribution and amount of bed-load were successfully analyzed.

Key Words: bed-load, hydrophone, digital sound recorder, gravel-bed river

1. 背景と目的

ダムからの人為的放流であるフラッシュ放流はダム下流の河川環境の制御や改善を狙う手段の一つである。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。そのため河床礫や過剰な付着藻類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移動の実態については実のところ実用的な実測が困難であることから十分に現象が把握できていない。そこで、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前報¹⁾で提案した。今回はその装置をもとに粒子の衝突角度や、衝突位置の違いが観測結果に及ぼす影響を分析し、土砂移動の時間・場所・粒径別の特性と流下している付着藻類の剥離によるChl.a濃度の変化との関係を調べるために現地観測を行なった。

2. 観測手法の構成

(1) 掃流砂の計測技術

これまで様々な流砂観測機器が提案されている。その

一例として澤井ら²⁾や水山ら³⁾はマイクロフォンを金属パイプの中に設置した掃流砂観測法を提案している。この方法では流砂の粒が金属パイプに当たり発生する音を解析し、流砂量を算定する。金属パイプを用いる方法は、主に山地河川での土砂流出の把握を目的として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⁴⁾⁵⁾。その他に平板を用いる掃流砂の計測法も提案されていて、例えば小田ら⁶⁾は粒径の判別法を提案している。また桑村ら⁷⁾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。平板を用いて衝突により生じるパルス波形を一つずつ分析する手法⁸⁾以外では、記録波形から衝突土砂の粒径の違いを直接識別することができないため、通過土砂の粒径を別途算定する必要がある。また河床が変動する自然河川を対象とする場合、装置の設置や配線等が煩雑となり迅速かつ多地点での計測には難がある。

(2) 本研究での観測手法

本研究での観測手法は、掃流砂の総量を捉えるというよりは、土砂粒径を一つずつ判別し、土砂移動の時空間的な違いを調べ、砂礫の移動が付着藻類や水草の流失に及ぼす影響の評価に利用することを念頭に置いている。

図-1 計測機器の構成

具体的な機器構成を図-1に示す。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と96kHzの記録が可能なZOOM Corporation製ZOOMを用いた。利用したICレコーダーは防水ではない。そのため、中サイズの大きさのファスナー付きビニール袋で、2重に密閉した。録音可能時間は約20時間である。ICレコーダーの音圧感度は十分であり、44.1kHzの場合、録音レベルを低感度モードのレベル4に固定、96kHzの場合は16bit、2chでMicLevel0.7とした。ICレコーダーは流されないようにビニール紐で20kgの鉄製オモリに結びつけた。タイロックが内側に来るようにして金属殻をICレコーダーの上にかぶせる。金属殻にはフライパンを使用した。ICレコーダーに向きがあるため、マイクが上流に向くように機器を設置した。そしてこれらの計測機器を図-2に示すように河床礫の間に設置した。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、またオモリ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が、本研究期間中のフラッシュ放流中には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、掃流砂を精度よく観測することができる。大型のハイドロフォン観測装置に比べると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、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、記録音波形の例を示す。ピーク音圧を P として、衝突直後の最初の半波長の時間の長さを $T(s)$ と定義する。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0.02 s程度続く。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。記録された波形は流水音と衝突音が混

合しているため、そのままでは、衝突音に基づく粒径の推定に影響を与える。そのため混合した音から

図-2 計測機器の配置

図-3 音圧 P と周期 T の定義

図-4 実験装置

図-5 96kHz のレコーダーから得た音圧と角度、落下位置の関係

図-6 44.1kHz と 96kHz のレコーダーから得た音圧と周期と粒径の関係

衝突音を区別するために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。

3. 室内実験

本章では、前報¹⁾で用いた手順をもとに、衝突物が金属殻に衝突した際に生じる振動音の特性と衝突角度や衝突位置の関係を調べる実験を行なった。この実験の目的は周波数、衝突角度、衝突位置を考慮することで計測精度の改善を目的としている。

(1) 実験方法

装置一式を水槽(縦35cm, 横60cm, 幅30cm)の中に沈めた。金属殻の大きさは直径26.5cmで高さ8 cmである。形状の影響が無視でき、実際の河川の礫と密度がほぼ等しいガラスビーズを使用する。ガラス

ビーズの密度は $\rho=2.65 \text{ g/cm}^3$ である。まず図-4(a)のように水槽の傾き θ を $0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ の順に変更させて、金属殻の中心に向けて一定の高さから衝突物の入射角の与える影響を調べる実験を行なった。次に衝突位置を変えて、自由落下させる実験を行なった。図-4(b)の平面図のように衝突位置1～10へと順番に衝突位置を変化させながら自由落下させた。衝突位置は等間隔に金属殻に印を入れ、縦方向と横方向の2方向で行なった。両実験では衝突物として直径20mmのガラスビーズを用いた。

最後に三種類のガラスビーズ(直径30mm, 20mm, 12mm)を金属殻の中心に衝突速度を変えながら自由落下させる実験を行った。

(2) 実験結果

はじめに96kHzのレコーダーから得られた、角度を変えた結果を図-5(a)に示す。水槽の角度が傾け

図-7 衝突粒径と推定粒径の比較

ば傾くほど、垂直方向の衝突力が減少して音圧が減少するのではないかと予想したが、実際の実験結果では、0° から25° の範囲では角度の音圧に対する影響は見られなかった。次に衝突位置を変える実験の結果を図-5 (b)に示す。同図から、衝突位置の音圧に対する影響は見られなかった。このことは、衝突によって金属殻が全体的に振動し、その振動が金属殻内部で伝搬しているためと考えられる。

結局、記録されたピーク音圧と、衝突角度や衝突位置のはっきりした関係性が見られず、これらを考慮して計測精度を向上させるまでには至らなかった。

最後に三種類の粒径のガラスビーズを金属殻の中心に自由落下させた実験から得られた結果を図-6に示す。44.1 kHz, 96 kHz共に粒径が大きいほど、音圧が大きくなっているが、周期のはっきりした傾向は認められなかった。また全体的に粒径グループごとにまとまってオーバーラップしていないことがわかる。これは波長が多少ばらついていても、推定粒径 D (mm)を求めることができることを意味している。これらの結果から重回帰分析を行い、44.1kHzでは

$$D = 29.07P^{0.634}T^{0.05} \quad (1)$$

を、96kHzでは

$$D = 386.7P^{0.27}T^{0.26} \quad (2)$$

を得た。(1),(2)式を用いて粒径を算定し、衝突粒径と比較したものを図-7に示す。図を見て分かるように96 kHzでは決定係数 R^2 が $R^2=0.8469$ となり、44.1kHzでは $R^2=0.7751$ となった。 R^2 は96 kHzの方が大きいことから96 kHzの機器のほうが44.1kHzより粒径の算定精度が良いといえる。

4. フラッシュ放流での土砂観測

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、フラッシュ放流中に行なった衝突音を分析して、土砂移動の時間・場所・粒径別の特性を算出する。最後に算出された土砂移動特性と流水中のChl. a濃度の観測地との関係を調べ、フラッシュ放流中に生じた付着藻類剥離プロセスを推定する。

図-8 上下川と調査地点

(1) 観測の概要

本研究では、2014年3月25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-8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 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ であり図-9に示す。これは平均年最大流量の6割程度に相当する。放流前に、図-8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)を設置した。Pt.aとPt.bには44.1kHzの機器を、Pt.cとPt.dには96kHzの機器を設置した。フラッシュ放流中の流水中のChl.a濃度の変化については灰塚ダム管理支所によるデータを用いる。Pt.aの少し下流とPt.dでフラッシュ放流中に表層水を60分間隔で500 mlを採水し、Chl.aを計測した。

(2) 現地観測の結果

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、Pt.aとPt.bには室内実験で求めた式(1)、Pt.cとPt.dには式(2)を用いて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-10に示す。またPt.a~Pt.dでの水位変化の

図-9 2014年3月25日フラッシュ放流流量図

図-10 各計測地点での粒径別・時刻別の衝突回数

計測値, Pt.aとPt.dで採水したChl.aの量についても併せて示している. Pt.aでは水位が最大に達する前に土砂の衝突回数がピークに達している. Pt.bは全体的に衝突回数が少なくなっている. Pt.cでは水位上昇に概括的に比例する形で土砂の移動が見られる. Pt.dでは全体的に衝突回数が少ないのと, 土砂の移動がピークに達する前に活発となっていることが分かる. Pt.bとPt.dのすぐ上流には堰があり, トラッピングが原因で衝突回数が少なくなっていると考えられる. また全計測地点で放流中の掃流砂の粒径は

大部分が2cm以下であることが分かる.

次に土砂移動の様子とPt.aとPt.dで採水したChl.aの量に関して, (a) Pt.aでは土砂移動が活発となる時刻とChl.aの量が概ね一致している. これは, 土砂移動が付着藻類の剥離に影響していることを表していると考えられる.

また(d)Pt.dでは, 土砂移動が最も盛んとなる時刻よりも後でChl.aの量が大きい値となっている. しかし衝突回数は少ない. これは土砂の衝突で付着藻類が剥離したと考えるよりは, 上流側で剥離した

Chl.aが下流側に流れてきたことが影響していると考えられる。

5. 結論

本研究では既報で提案した手法¹⁾での衝突角度や衝突位置を変化させた室内実験を行い、観測結果に及ぼすこれらの影響を分析した。さらに室内実験で得られた衝突粒子の粒径の算定式を用いて、2014年の3月に実施されたフラッシュ放流の現地観測データを解析し、土砂移動の時間・場所・粒径別の特性と水位、Chl.a濃度との関係を調べた。以下に本研究の主要な結論を述べる。

- ・ 衝突する角度や衝突位置による音圧、周期に関する系統的な影響は認められなかった。
- ・ 流水中のChl.a濃度の変化と局所的な土砂移動の様子を比較することが出来た。

現段階では、ピーク音圧や衝突直後の周期のばらつきが大きく、これらの波形特性と衝突条件との関係に関する一般性や物理的裏付けに問題を有している。波形特性のばらつきについては、ICレコーダーの防水化にファスナー付きビニール袋を用いたことにより、伝播経路の複雑さが音波の不安定な減衰を引き起こしている可能性があり、機器構成について、さらなる検討が必要と考えている。今後はより実用的にするために連続計測可能時間を長くすることも必要である。

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、国際航業、建設環境研究所の皆様に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) 椿涼太, 坪下健太郎, 河原能久. 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, 河川技術論文集, Vol. 20, pp. 49-54, 2014.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) T. Uchida, A. Okamoto, S. Hayashi, T. Suzuki, A. Fukumoto, S. Yamashita, and S. Tagata. Hydrophone observations of Bed-load transport in mountainous rivers of Japan. In Proc. of the 12th ISRS symposium (Advances in River Sediment Research), pp. 1749-1756, 2013.
- 6) 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.
- 7) 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.

(2014. 9 30 受付)