

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

ADVANCED ESTIMATION OF SEDIMENT TRANSPORT INTO RESERVOIR USING A PIPE HYDROPHONE

小林草平¹・竹門康弘²・角哲也³・富阪和秀⁴・山崎友也⁵・米田格⁶・堤大三⁷

Sohei KOBAYASHI, Yasuhiro TAKEMON, Tetsuya SUMI, Kazuhide TOMISAKA, Yuya YAMAZAKI, Itaru YONEDA and Daizo TSUTSUMI

¹非会員 農博 京大防災研究所 水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 農博 京大防災研究所 水資源環境研究センター准教授 (同上)

³正会員 工博 京大防災研究所 水資源環境研究センター教授 (同上)

⁴非会員 京大防災研究所 技術室 (同上)

⁵非会員 京大防災研究所 技術室 (同上)

⁶非会員 京大防災研究所 技術室 (〒569-1041 大阪府高槻市奈佐原944)

⁷正会員 工博 京大防災研究所 流域災害研究センター准教授
(〒506-1422 岐阜県高山市奥飛騨温泉郷中尾436-13)

We installed a pipe hydrophone and monitored bedload for two years at an upstream site of the Nunome Dam in Nara Prefecture. The data of acoustic energy and counts of different pulse amplitudes collected by the hydrophone were converted to volume of transported sediment (m^3/s) based on equations obtained by sediment injection experiments at the site. Relationships between sediment size and acoustic energy or pulse counts suggested that bedload materials of $>2\text{mm}$ were more likely measured by the hydrophone than finer materials.

Our estimation of annual sediment transport to the dam ($7400\text{--}11000\text{m}^3/\text{year}$) was comparable to mean annual volume of sediment deposition in the dam ($6400\text{m}^3/\text{year}$). Although 36-39 high-flow events occurred per year, more than 40% of the annual sediment transport was derived from a few large floods. Counts of different pulse amplitudes (16-, 4-, 2-fold) corresponded to bedload transport of different-sized materials (fine gravels, coarse gravels, pebbles, respectively).

Key Words : *hydrophone, bedload measurements, sediment transport into reservoir, material size, flood events*

1. はじめに

ダムの堆砂量は貯水池内の深浅測量に基づき調べられ、異なる年間の差分によってその期間にダム上流から流入した土砂量が求められる。しかし、測量は通常一年に一度であるため土砂量の変化は年単位でしか追えない。こうした年間のデータから、土砂が多く流入した出水イベントを特定し、出水の水文特性と土砂量の関係を分析するのは難しい。

溪流砂防域や河川においてハイドロフォンを用いた流砂量の観測が近年増えつつある^{1),2)}。ハイドロフォンとは河床に埋めた金属管により河床を流れる土砂の衝突音

を拾い、電気信号に変換しデータを記録する機器のことである。衝突音の強度や頻度から流砂量を間接的に観測する手法であるため、実際に流砂量を推定するには衝突音と土砂量の検量線が必要となる。全流砂の中で河床の金属管に衝突するのは一部の流砂であり、また衝突しても音の重なり等により収録されない部分もある。また、粒径によって、管に衝突する確率も、衝突音の強度も異なる。ハイドロフォンによる流砂量の推定の精度を上げるため、衝突が多くても飽和しにくい音響波形(音圧)の使用^{1),2)}、増幅率の異なる複数のパルス頻度の使用³⁾、これらに加えて流量など水理特性の使用⁴⁾など、検量線の作成において様々な工夫が報告されている。

本研究は、ダム流入土砂量とその時間変動の把握にお

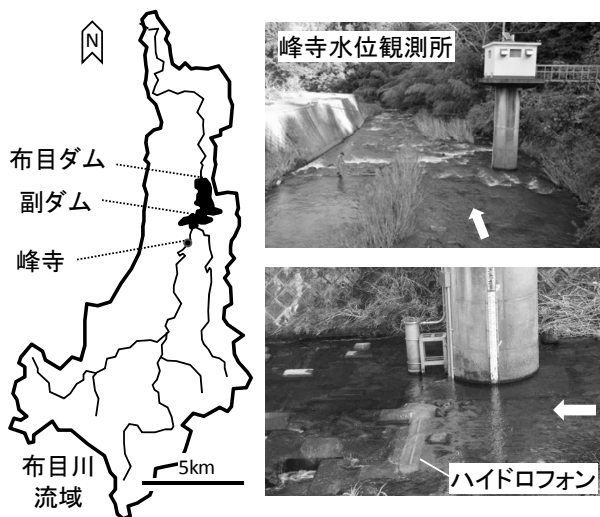


図-1 観測地点の位置と写真

けるハイドロフォン観測の可能性を探るため、奈良県の木津川上流の布目ダムの流入河川地点で約2年に渡る流砂観測を行った。また、複数の人工的な土砂投入実験を行い、特に土砂の粒径に着目し、衝突音と土砂量の関係について分析を行った。ハイドロフォン観測から推定した土砂量と実際のダム堆砂量を比較することで、ハイドロフォン観測の可能性について検証した。

2. 調査方法

(1) ハイドロフォンの設置と観測

布目ダムには水質改善用の副ダム（堤高：14.5m，貯水容量28.3万 m^3 ）が設置されており，この約1km上流に位置する布目川流量観測所地点（峰寺）を対象とした（図-1）。峰寺の標高は約300m，流域面積は50.92 km^2 ，河床勾配は約1/100で，川底は比較的平坦で川幅が18.3m，兩岸は護岸でほぼ垂直であった。

代表的な流砂量を計測できる流路のほぼ中央に，ハイドロフォンのセンサー管（ステンレス製，径48mm，長さ2.25m）を，流路に対し横向きに，床固め（河床）から管径の半分を露出させた状態でモルタルで固定した。ハイドロフォンは，ウレタン材で裏打ちした管内に水中マイクロフォンを取り付けたセンサー部，衝突音の電気信号を増幅するアンプ部，バンドパスフィルタで特定周波を抽出しパルスや電圧値を収録するロガー部によって構成される。粒子の衝突により発生した電圧（音響波形：mV）と，電圧の大きさが閾値を越えた回数（パルス数）が収録される。後者は6種の倍率（2，4，16，64，256，1024倍）に増幅され，それぞれでパルス数が記録（大きい増幅率ほど小さい電圧を検知）される。2011年4月から5分間隔で観測を始めた。付近に濁度計も設置した。

(2) 土砂投入実験

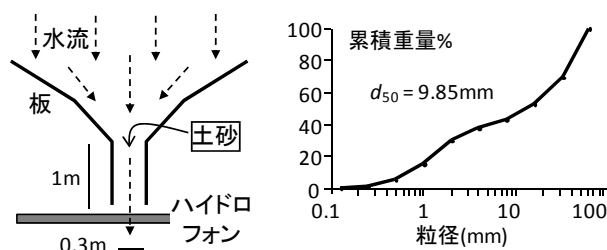


図-2 投入実験の模式平面図と現地の粒度分布

表-1 各実験の条件

実験日	水路条件		土砂条件	
	流速 cm/s	水深 cm	種類	平均粒径 mm
1 2011/11/21	117, 154	20, 18	混合	0.84, 5.44, 9.33
2 2012/1/5	149	10	単一	6, 12, 20, 30
3 2012/11/1	173	10	混合	9.85

衝突音と土砂量の関係，土砂粒径の影響を分析するため，現地での土砂投入実験を3回行った。センサー管の上流に板を並べて流れを集めて幅30cm程度の流路を作り，管の1m上流から既知量の土砂を投入し，投入時の衝突音データを回収した（図-2，表-1）。1回目は平均粒径の異なる3種の混合粒径を，2回目は4種の単一粒径を投入した。また，投入土砂の粒子数を把握し，粒子の衝突率も調べた。3回目は衝突音－土砂量の検量線の作成を目的に，現地の河床土砂を粒径分布（図-2）を把握して投入した。いずれも投入は土砂量を変え多数の繰り返しのものを行った。

(3) 流砂量の推定とダム堆砂との比較

音響波形（mV）または各パルス数による投入土砂量の直線回帰を行い，流砂量の推定に用いた。観測地点での単位時間あたり流砂量 S_B （ m^3/s ）を次式により求めた。

$$S_B = \alpha \times p \times W \div L \quad (1)$$

ここで α は回帰係数， p は計測値（音響波形またはパルス数を単位時間あたりに換算）， W は現地の川幅（18.3m）， L はハイドロフォン長（2.25m）である。

年間で総和した流砂量 ΣS_B （ m^3/year ）を，布目ダム堆砂量と比較し推定の妥当性を検証した。ここでは粗い土砂のほとんどが堆積する副ダムにおける約20年間の年間浚渫量を比較対象とした。推定した流砂量を以下の式により副ダムでの堆砂量 S_D （ m^3/year ）に換算した。

$$S_D = \Sigma S_B \times \frac{A_D}{A_H} \div r \div (1 - x) \quad (2)$$

ここで， A_D は副ダム流入点での流域面積（63.85 km^2 ）， A_H はハイドロフォン地点の流域面積（50.92 km^2 ）， r は副ダム堆積中に占める粗い粒子の割合（後述）， x は土砂堆積の空隙率（0.4を仮定）である。

また，濁度から単位時間あたり浮遊砂量 S_S （ m^3/s ）を

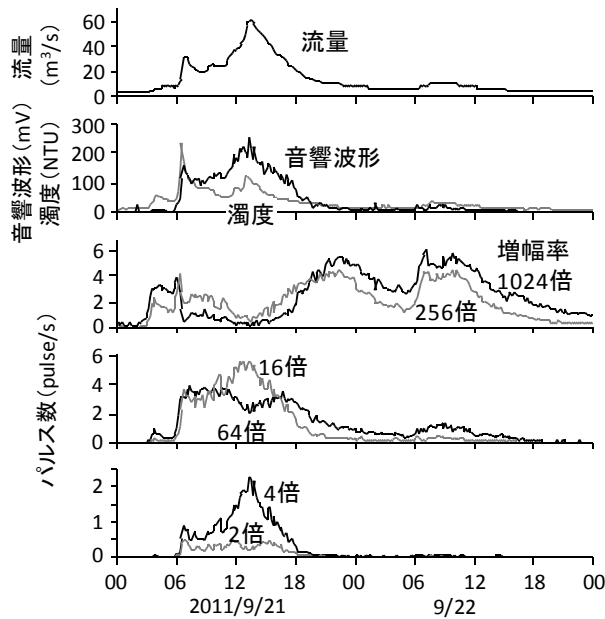


図-3 出水時における各計測値の反応 (2011年9月)

推定した。一般に、浮遊砂濃度 C_s (mg/l) は濁度 (NTU) と比例関係にあり、係数は1.0~2.0の範囲をとる。ここで係数を1.5と仮定して C_s を求め、以下の式より S_s を求めた。

$$S_s = C_s \times Q \div \rho \div (1 - x) \quad (3)$$

ここで C_s の単位は kg/m^3 、 Q は流量 (m^3/s)、 ρ は固体密度 (2650kg/m^3)、空隙率 x は0.5を仮定した。さらに流域面積比 A_D/A_H をかけて副ダム流入点の土砂量とした。

(4) 流量と発生パルスの関係

増幅率の異なるパルスはそれぞれ特定の粒径の衝突に対応することが考えられる。これより、その粒径の限界掃流力が発生したときにパルスの反応が始まることが予想される。そこで2011年の主な出水イベントを対象に各パルスの反応開始時と終了時の流量を調べた。

また、各流量時に発生する摩擦速度 u_* (m/s) とそれによる可動粒径を以下により推定した。

$$u_* = \sqrt{ghi} \quad (4)$$

ここで g は重力加速度 (9.8m/s^2)、 h は水深 (m)、 i はエネルギー勾配 (m/m) である。 h と i には峰寺で各流量時に観測された水深と水面勾配を当てはめた。摩擦速度と可動粒径の関係は岩垣の公式⁵⁾を用いた。

$$U_{*c} = 80.9d \quad (5)$$

U_{*c} は限界摩擦速度 (cm/s)、 d は粒径 (cm) である。

3. 結果と考察

(1) 流量に対する音響波形・各パルスの反応

増幅率1024倍と256倍のパルスは、平水時でも絶えず

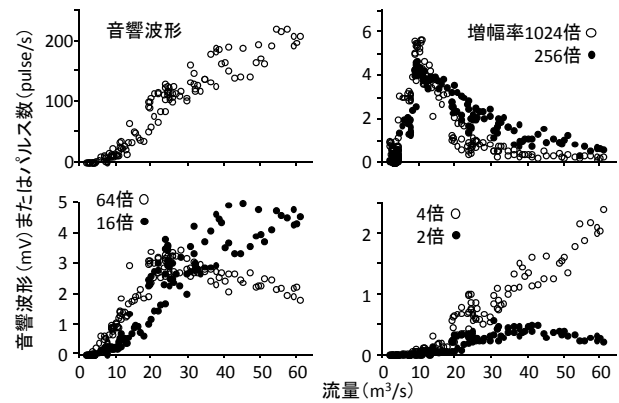


図-4 流量と音響波形・各パルスの関係 (図-3と同出水)

検出され (5分間にパルス数が100を超える場合も多い)、投入実験時にも意図しないパルス数が観測された。

2011年9月の出水を例に (図-3)、出水中の音響波形とパルスの反応を示す。音響波形は流量に似た挙動を示し、出水前半にピークのある濁度とは対照的であった。ただし、流量よりも開始と終了の変化は急激で、一方でピークはそれほど尖らず、小刻みな変動があるのが特徴である。パルス数にも同様に小刻みな変動が見られた。

同出水を流量ベースにプロットしたものを図-4に示す。音響波形は流量とともに増大する一方、増幅率1024倍、256倍、64倍のパルスは、いずれも出水初期はパルス数が増えるが、流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ 前後から順に流量とともにパルス数が下がった。こうした出水中の高倍率パルス数の低下や飽和は既存研究から自明の現象である。16倍パルスは音響波形と似た挙動を示した。なお、音響波形は $30\text{m}^3/\text{s}$ 前後で流量に対する増加率が減少し、16倍パルスは流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ 前後で飽和状態にも見える出水があった。4倍パルスは流量が $20\text{m}^3/\text{s}$ 前後から流量に比例して増加する一方、2倍パルスは大きな流量で減少した。

以上より、土砂の全体量の推定において、増幅率1024倍、256倍、また2倍のパルス数は不適と考えられた。

(2) 投入粒径と音響波形・パルス数の関係

同じ体積の土砂量を投入しても、粒径により音響波形やパルス数は異なった (図-5)。音響波形は平均粒径が 0.84mm ($<2\text{mm}$ が81%を占める) ではほとんど反応がなく、 5.44mm ($>2\text{mm}$ が97%) 以上で十分な反応がみられた。同様の傾向が増幅率64倍と16倍のパルスで見られた。また、4倍パルスでは 12mm 以上で、2倍パルスでは 20mm 以上で十分な反応がみられた (図-5)。ただし、粒径が大きすぎると音響波形やパルス数は低下した。

土砂粒径と検知率の関係を図-6に示す。投入した粒子全てがパルスとして計数されれば検知率は1となる。検知率は低増幅率パルスほど低く、同増幅率では土砂粒径とともに高まった。衝突率は相対水深 (水深/粒径) や無次元掃流力とともに低下するとみられる^{6), 7)}。検知率は、64倍パルスでは全粒径で0.1を超えたが、16倍パ

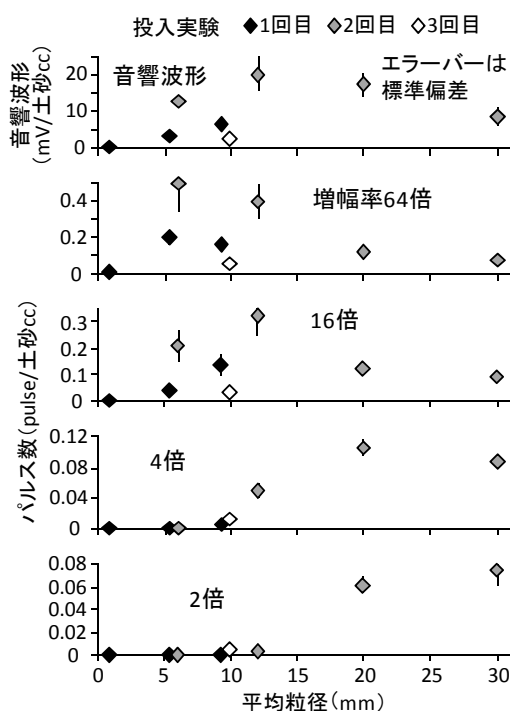


図-5 土砂粒径と単位土砂体積あたり音響波形・パルス数

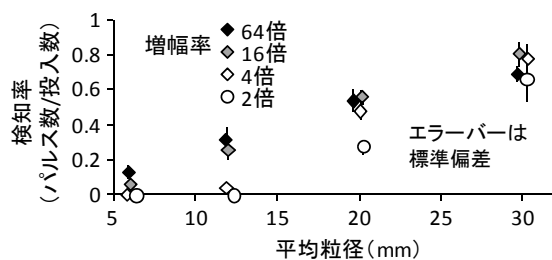


図-6 土砂粒径と検知率の関係 (実験2回目)

スでは6mm, 4倍と2倍パルスでは12mmで0.1を下回った。

以上より、音響波形や増幅率64倍、16倍のパルスが検知しているのは少なくとも1mm以上の粒子であることが示された。これまでもハイドロフォンが検知する粒径が2mm以上であることや⁷⁾、4mm以上の粒子に対して増幅率16倍パルス等の反応がよい事が報告されている⁸⁾。本研究でも5mm以上の粒径で音響波形やパルスの反応が最も良かったが、実際に土砂に占める割合等も踏まえ、本稿では2mm以上の粒子を検知しているものと仮定する。

(3) 土砂の投入速度と音響波形・パルス数の関係

同粒径であっても、実験間や実験内で土砂体積あたりの音響波形やパルス数にばらつきが見られた。実験間のばらつきには、流路条件や土砂の粒度分布の違いが影響しているとみられる(表-1)。

同一粒度で多数の投入を行った3回目の実験では、土砂の投入速度(体積/投入時間)と音響波形(単位土砂体積あたり)に明瞭な負の相関がみられた(図-7)。投入速度が大きいと個々の衝突が重なるためと考えられる。

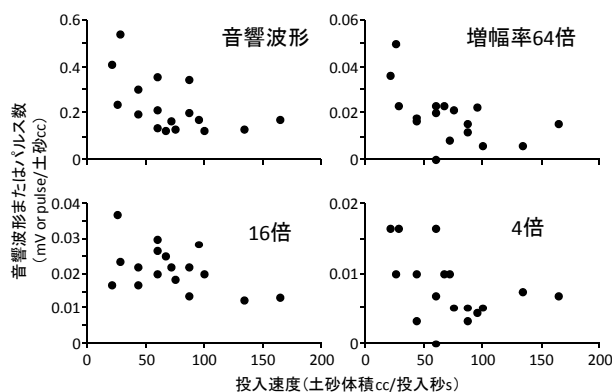


図-7 土砂投入速度と音響波形・パルス数の関係

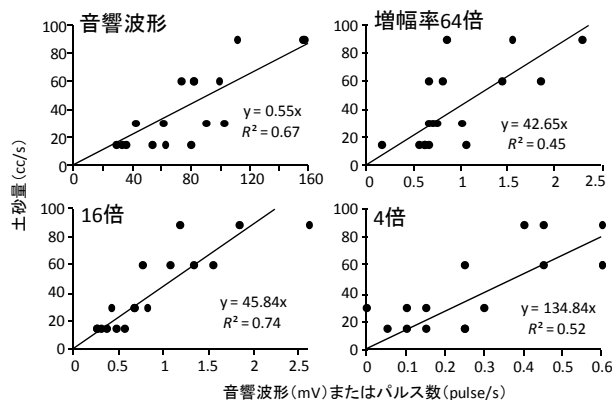


図-8 衝突音と土砂量の検量線

同様の傾向が増幅率64倍パルスでも見られたが、16倍パルスでは傾向が弱まり、4倍パルスでは傾向が不明瞭で投入速度の影響が小さいことが示唆される。

(4) 流砂量推定の検量線の作成

現地粒度を用いた3回目の実験結果から、土砂量(体積)を音響波形・パルス数で直線回帰し(切片0)検量線を作成した。回帰の決定係数は、増幅率16倍パルスで最大で、次いで音響波形で大きかった(図-8)。

これまでの結果を踏まえ、増幅率16倍のパルス数または音響波形を中心に流砂量を推定するのが妥当と判断される。64倍パルスは流量が大きい(土砂量も多い)ときにパルス数が減少し、4倍は逆に流量が小さいときの反応が悪い(図-4)。回帰の決定係数も踏まえ、これらは単独での土砂量の推定は誤差が大きいと判断した。

流砂量について3パターンでの推定を試みた；①16倍パルスの回帰式、②音響波形の回帰式、③音響波形50mV未満は64倍パルスの回帰式で50mV以上は16倍パルスの回帰式。最終的には投入土砂に含まれた2mm以上粒子の割合である0.7をかけて推定流砂量とした(つまり、本研究では2mm以上粒子を流砂として評価する)。

(5) 流砂量の推定とダム堆砂との比較

(2)式の r に副ダムの堆砂に占める2mm以上の割合であ

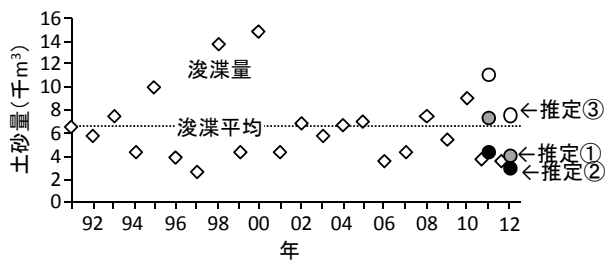


図-9 副ダムの浚渫量と推定土砂量（3パターン）

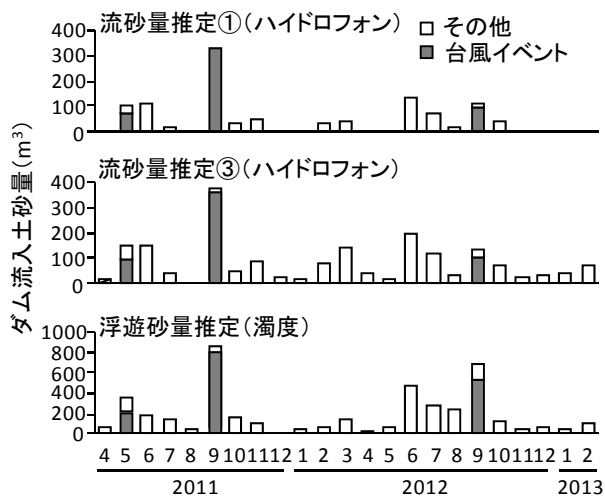


図-10 ハイドロフォンと濁度による土砂量推定

る0.1（布目ダムの資料より）を代入し、副ダムでの年間堆砂量 S_D を推定した。2011年（4月～3月）、2012年（4月～2月）の堆砂量として、①では0.39-0.73万 m^3 、②では0.28-0.42万 m^3 、③では0.74-1.10万 m^3 と推定された。音響波形のみを用いた②では検量線の傾きがやや小さいため低く見積もられた。一方、音響波形による条件分けした③では、小・中規模の出水時の土砂量が①より高く推定され全体も高まった。副ダムの実際の年間堆砂量（浚渫量）は平均0.64万 m^3 で、2011年は台風による流砂が多かったことを踏まえると、特に①と③の推定は副ダム堆砂量と概ね対応するものである（図-9）。

(6) 流砂の挙動と流量との関係

図-10に流砂量の変化（①と③による推定、ただし2mm以上の土砂として）と濁度計から推定した浮遊砂量の月変化を示す。浮遊砂量は年間で流砂量の3-4倍の大きさであった。いずれの土砂量も5～10月に多く、特に2011年9月の台風時に大量にダムに流入したことが示される。③の推定では小・中規模の出水の土砂量がより高く推定され、浮遊砂に似た月変化パターンを示した。

出水イベント単位の整理から、流砂量は流量に大きく規定されていることが示された（図-11）。両年とも、全流砂量はピーク流量より全流量と関係が深かった。

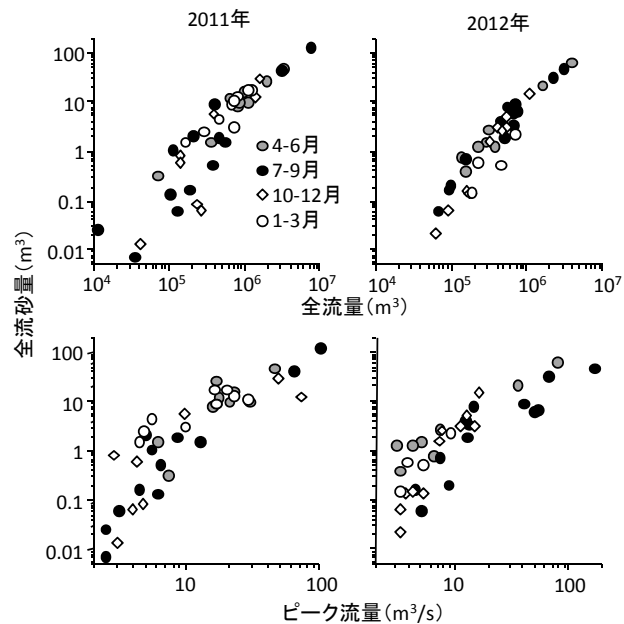


図-11 全流量（上）・ピーク流量（下）と全流砂量の関係

200 m^3/s を越す出水が2012年9月にあったが、増水の継続時間が短く流砂量は最大にはならなかった。流量と流砂量の関係のばらつきの一部は季節に関係し、特にピーク流量に対する流砂量は、春や冬に比べて夏や秋に低かった（図-11）。各年36-39の出水イベントが見られたが、上位3つの出水の流砂量が年間の41-42%を占めた（濁度から推定した浮遊砂の場合は45-48%であった）。各出水時、流砂と浮遊砂では流量に対する挙動が異なったが（図-3参照）、誌面が限られるため詳細は割愛する。

(7) 各パルスが発生する流量と可動粒径

各出水における各増幅率（16倍、4倍、2倍）の反応開始・終了時の流量を集計したところ、16倍パルスは3 m^3/s 前後、4倍パルスは5 m^3/s 前後、2倍パルスは6.5 m^3/s 前後で反応が起こる・止むことが分かった（図-12）。

これらの各流量時における摩擦速度と可動粒径を表-2に示す。流量3 m^3/s 時の可動粒径の3.9mmは、投入実験で示した16倍パルスが反応する粒径と対応するものである（図-5）。4倍と2倍パルスの発生流量の可動粒径（25.8mmと45.6mm）は、投入実験において検知された最小粒径の約2倍あったが、それぞれのパルスが最も反応よい粒径（20mmと30mm）とは大きくは違わない。これらは、各パルスは特定の粒径の移動を表すものとして取り扱えることを示しており（例えば、16倍は砂利小：2-10mm、4倍は砂利大：10-30mm、2倍は礫：30-50mmなど）、図-13のように出水時のパルスから土砂移動形態を推測することも可能である。

(8) ハイドロフォン観測の可能性

本研究における土砂量の推定はダムの実堆砂量に概ね対応したが、状況によっては推定に大きな誤差を生じう

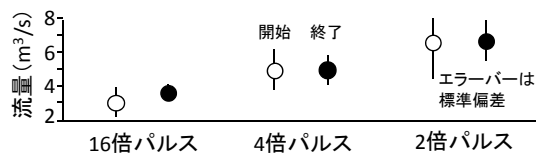


図-12 各パルスの反応開始と終了の流量

表-2 観測点における流量と摩擦速度，可動粒径の関係

流量 m³/s	摩擦速度 cm/s	可動粒径 mm
3	0.32	3.9
5	2.09	25.83
6.5	3.69	45.59

る。1つの問題は川幅である。観測地点は比較的平坦で、流量に関わらず川幅全体に土砂が均一に流れると仮定できるが、流砂が流心等に集中する河道では、推定が過大評価になりやすい。

2つ目の問題は、水深や流速の増大に伴う粒子の衝突率の低下である。本研究では平水時に検量線を作成した。出水時に金属管を飛び越える粒子が増えれば、推定土砂量は過小評価となる。流量を考慮した土砂量推定⁹⁾がより望ましいであろう。低増幅率パルス（飛び超えの少ない粗い粒子に対応）による推定も可能性の1つである。

3つ目は、衝突頻度の増加に伴う音の重なりや残響の影響である。16倍パルスや音響波形における流量に伴う増加率の減少は（図-4），この影響を示すものとみられる。低増幅率パルスを検量線に含めることでこうした影響を緩和できる可能性がある。衝突頻度に伴う検知率の低下を前もって予測した推定も試みられている²⁾。

もう1つは粒径の影響である。ハイドロフォンが検知する主な粒径集団と、実際の全流砂に占めるその粒径集団の割合によって、推定土砂量が大きく左右されることは本研究から明らかである。今回は2mm以上と仮定したが、より大きい粒径が主に検知される可能性もあれば、大きすぎる粒径では逆に検知が下がる可能性もあり、粒径については今後さらに調べていく必要がある。

最後に、ハイドロフォンの検知が2mm以上で、濁度計の検知が主に50μm以下だとすると、ダム堆砂の大部分を占めるそれらの間の径は評価されていないことになる。両観測をあわせた推定や今回は不適とした高倍率パルスの分析を開発していくことが期待される。

4. まとめ

本研究は、木津川布目ダム上流で2年に渡りハイドロフォンによる移動土砂観測を行った。投入実験によりハイドロフォンが検知する流砂の径は主に2mm以上である

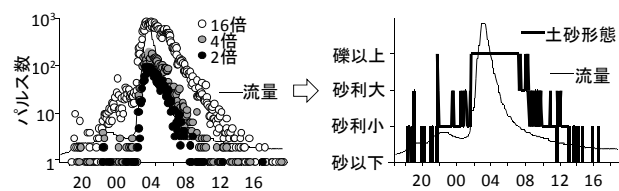


図-13 各パルスから示される土砂移動形態の変化

ことが判明した。ハイドロフォンから推定される年間流砂量は副ダムの実堆砂量と概ね対応することから、ハイドロフォン観測の有効性が示された。ハイドロフォン観測から、各出水の流砂量は流量と深い関係にあり、上位3つの出水が年間流砂量の41-42%を占めることが示された。また、異なる増幅率のパルスの挙動から、砂利や礫など異なる粒径の移動が表されることも示された。全流砂量の推定に誤差をもたらす川幅、衝突率の変化、衝突頻度、粒径の問題について議論した。

謝辞：本研究は国土交通省建設技術研究開発助成制度の河道整備・管理に関する技術研究開発「河川環境のための河床地形管理手法に関する技術開発」のもと行われた。観測にご協力・助言いただいたハイドロテック（株）野中理伸様にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 水山高久，松岡美和，野中理伸：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，Vol.61, pp.35-38, 2008.
- 2) 鈴木拓郎，水野秀明，小山内信智，平澤良輔，長谷川祐治：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，Vol. 62, pp.18-26, 2010.
- 3) 堤大三，平澤良輔，水山高久，志田正雄，藤田正治：山地流域における音響法を用いた流砂量観測，京都大学防災研究所年報，第53号B, pp.537-543.
- 4) 中谷洋明：ハイドロフォンシステムの流砂捕捉率に対する流量の影響に関する事例検討，砂防学会誌，Vol. 61, pp.12-20, 2008.
- 5) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究 (I)限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，Vol. 41, pp.1-21, 1956.
- 6) 長谷川祐治：掃流砂の運動形態を考慮したハイドロフォンによる流砂量計測に関する研究，平成23年度砂防学会研究発表会概要集，pp.60-61, 2011.
- 7) 神野忠広，吉田俊康，宮澤和久，谷口丞，樋田祥久：平川・源太郎堰堤に設置したハイドロフォンの基本特性に関する現地実験，平成21年度砂防学会研究発表会概要集，pp.70-71, 2009.
- 8) 小田晃，水山高久，Larone J. B.，野中理伸，松岡美和：掃流砂の運動形態を考慮したハイドロフォンによる流砂量計測に関する研究，平成23年度砂防学会研究発表会，pp.60-61, 2011.

(2013. 4. 4受付)