

水理模型実験におけるハイドロフォンを用いた 流砂量計測

MEASUREMENT OF BED LOAD USING HYDROPHONES IN HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS

小田 晃¹・長谷川祐治²・水山高久³・野中理伸⁴・宮本邦明⁵

Akira ODA, Yuji HASEGAWA, Takahisa MIZUYAMA, Michinobu NONAKA and Kuniaki MIYAMOTO

¹正会員 博士(工) (財)建設技術研究所 筑波試験所(〒300-2633 茨城県つくば市遠東904-1)

²正会員 工修 (財)建設技術研究所 筑波試験所(〒300-2633 茨城県つくば市遠東904-1)

³正会員 農博 京都大学大学院教授 農学研究科森林科学専攻(〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

⁴(株)ハイドロテック(〒529-1642 滋賀県蒲生郡日野町上野田876)

⁵正会員 工博 筑波大学助教授 農林工学系(〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Recently, in order to obtain basic data for the integrated management of the sediment transport in a river basin, several monitoring of the bed load by indirect estimation in actual rivers called the hydrophone method have been conducted and examined for practical use. In hydraulic model experiments to evaluate the function and efficiency of installing sabo facilities in rivers, the bed load is measured by trapping directly the sediment using boxes, sieves, etc.

In the present study, we measured the temporal variations of pulse counts reflected from collisions the sediment particles with the various shapes of hydrophones which are laid in a rectangular channel. We then compared the results of the measurement of bed load at the downstream end of the geometric model by means of hydrophones with those obtained from the conventional way of measuring bed load by using sieve. As a result, it has been confirmed that the results of actually measured bed load are in good agreement with those obtained from pulses by mean of hydrophones and therefore that hydrophone is indeed applicable to hydraulic model experiments.

Key Words : bed load, hydrophone, measurement, hydraulic model experiment, pulse

1. はじめに

近年、水系一貫した土砂管理を目的として実際の河川における流砂量のモニタリングが各地で試験的に実施されている^{1)~4)}。その中で、河床に設置した金属管に流砂が衝突する際に発する音響パルス数から流砂量を間接的に推定する方法(ハイドロフォン流砂計測法)が開発され¹⁾、実用化に向けて検討が行われている^{4)~8)}。

一方、河川・砂防施設の配置計画検討のために実施されている水理模型実験では、流砂量計測は流砂を直接採取計量することにより行われており、計測箇所もサイフォンを用いた浮遊砂の採取計測のほかはもっぱら水路下流端でのみ行われている現状にある。このような直接採取による計測方法では、時間的な流砂量変化が激しい場

合や実験が長時間にわたる場合多大な労力を要する上、模型の任意の断面における掃流砂量計測ができないといった問題がある。

そこで、筆者等は模型実験における流砂量計測の簡素化と任意断面における流砂量の計測を目的として、ハイドロフォン流砂計測法の水理模型実験への適用について検討を行っている。本論では、まず、ハイドロフォンの形状の違いによるカウントされるパルス数の違いについて、および途中断面での流砂量計測を想定したスリット急縮部での流砂量のカウント数への応答特性について、それぞれ直線矩形水路を用いて行った基礎的な実験結果について述べる。次に、模型水路下流端にハイドロフォンを設置し、従来の土砂採取による流砂量計測結果との比較を行い、水理模型実験への適用可能性について考察する。

2. ハイドロフォン流砂計測装置の概要

今回使用したハイドロフォン流砂計測装置のシステム構成を図-1に示す。基本的には水山ら⁴⁾が現地において設置しているシステムと同じである。なお、今回の実験ではパルス数の計数時間は5秒間としており、用いたデータロガーでは最大約11時間連続記録が可能である。

実験に用いたハイドロフォン（金属管）の断面形状は表-2に示すように、断面形状が円形（外径27.2mm、内径25.2mm）、正方形（外寸16mm×16mm、内寸13.6mm×13.6mm）、長方形（外寸10mm×22mm、内寸7.6mm×19.6mm）の3種類である。管の長さはすべて1mである。なお、円形断面のハイドロフォンには1mの直管の片方の端に直角に円管を継ぎ足してL字形をしたものも作成している。特に、急縮部での実験と模型実験にはL字形のハイドロフォンが用いられている。マイクロフォンは管内の一方の端に、L字形の場合は継ぎ足した方の端に配置されている。写真-1に模型実験でのハイドロフォンの設置状況を示す。

マイクロフォンから得られる信号は4段階の倍率（ch1～ch4）に増幅され円周方向の固有振動数に対応する8kHzのバンドパスフィルターを通した後包絡線検波され、その振幅がchによらず一定に設定された敷居値を越えるときにパルスとして計数し記録される。表-1に増幅倍率を示すように、各chの増幅倍率の組み合わせはあらかじめ3通りに設定されており、それぞれch1の増幅倍率を用いて感度1～3と呼ぶ。表-1の値は、各感度、各chの増幅倍率を示している。

3. 実験概要

(1) 直線矩形水路実験

実験に用いた直線矩形水路は可変勾配、幅1.0m、長さ20mである。水路床は粒径2.0mmの一樣砂を貼り付けた粗面固定床である。実験ケースを表-2に示す。No.1～No.18までは流量一定で5分間通水し、上流端から給砂を

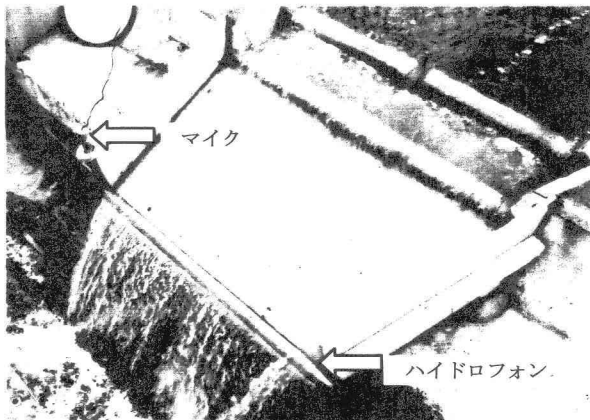


写真-1 ハイドロフォンの設置状況

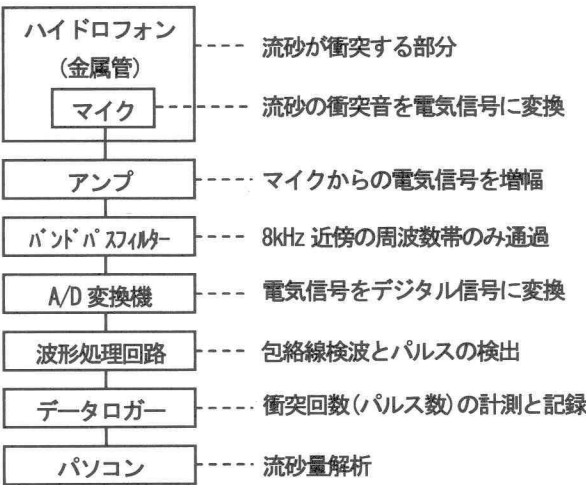


図-1 ハイドロフォンのシステム構成

表-1 アンプの倍率設定とチャンネルの関係

感度	ch1	ch2	ch3	ch4
1	1.0	4.7	22.1	103.8
3	3.0	7.1	16.6	38.9
5	5.0	11.8	27.6	64.9

表-2 矩形水路実験の条件一覧表

No	実験	金属管断面形状 寸法は外寸	実験砂	流量 ℓ/s	感度
1	金属管の 形状の違いに関する 実験	長方形 10mm×22mm×1m	一樣砂 ・ 粒径 2.0mm	10	3
2		正方形 16mm×16mm×1m		10	5
3				10	3
4				10	5
5				10	3
6		円形直管 直径 27.2mm×1m		10	5
7	砂の違いに関する 実験	円形L型 直径 27.2mm×1m		10	3
8				10	5
9				5	3
10				5	5
11				20	3
12				20	5
13			混合砂 ・ 平均粒 径 2.0mm	5	3
14				5	5
15				20	3
16				20	5
17				10	3
18				10	5
19	スリット透過	部実験	—	3	
20	部実験		—	5	

行っている。流量は表-2に示すように3種類で、給砂総量はいずれのケースも空隙込みで3.75lである。ハイドロフォンは水路下流端に接続する斜路下流端に設置されている。また同時に水路下流端で流砂量を計測した。

No.19とNo.20はスリット砂防えん堤の透過部を想定した急縮部（幅4.8cm、長さ30cm）を水路下流端に設置した実験で、ハイドロフォンは透過部上流端から15cmの位

置に透過部を横断するように設置した。また、実験は、土砂を急縮部の上流に敷いて（堆積部）急縮部上流端を閉じて湛水させた後開き、自然流下による土砂流出の状態で行い、同時に下流端で流砂量を計測した。

実験に使用した砂は、粒径 2.0mm の一様砂と、図-2 に示す粒度分布を持つ平均粒径 2.0mm の混合砂である。



写真-2 スリット透過部実験のスリット部の状況

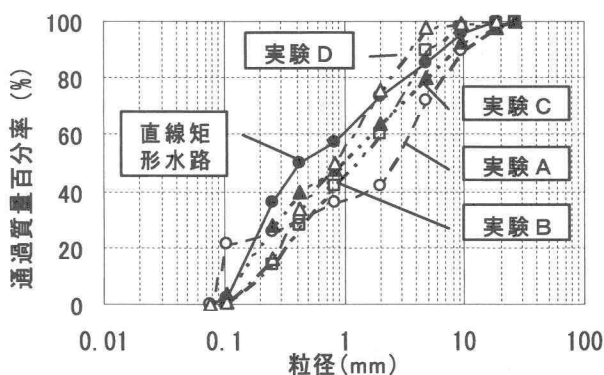


図-2 実験砂(混合砂)の粒度分布曲線

(2) 地形模型実験

4 種類の模型実験（実験 A～D）でハイドロフォンによる流砂量計測を実施した。それぞれの実験に用いた流砂の粒度分布を図-2 に示す。

実験 A・B・C は洪水を対象とした実験であり流量が時間的に変化するが実験 D は流量の時間的な変化はない。なお、実験 A は同一の洪水波形を 2 回繰り返しており、1 波形目の実験を A-1、2 波形目の実験を A-2 と呼ぶ。模型下流端では 3～5 分間隔で流砂量を計測している。

4. 計測結果と考察

(1) 直線矩形水路実験

a) ハイドロフォンの形状の違いによる流砂量とパルス数の応答性

No.1～No.6 の実験ケースのうち No.1,3,5（感度 3）では

すべての ch でパルスが計数されなかった。ほかの実験ケースでは、一般にそのケースに特有の ch でのみパルスが得られている。なお、No.5 とほぼ同じ条件と考えられる No.7（円形 L 型）ではパルスがカウントされている。

No.7 で得られたパルスが No.5 で得られなかったのは No.5 が直管であるためこの実験条件では管内の残響が大きく振幅が常に飽和していたからではないかと推定している。また、No.1,3 でパルスが得られなかったのは、ハイドロフォンに用いた管の厚さが円形のそれに比べて 0.2mm 厚いため衝突音の音圧が小さかったことと、フィルターの周波数が形状に合っていなかったため最終的に得られる振幅が小さく敷居値を越えられなかったためではないかと推定している。

そこでパルスが良好に得られた No.2,4,6,8（感度 5）を対象として形状の違いによるパルス数の時間変化を比較する。パルスが得られた ch は形状により異なるため、ここでは No.2,4,6 は ch4、No.8 は ch3 の Pulse 数の比較を No.8 の流砂量とともに図-3 に示す。

図-3 より、No.2,8（長方形と円形 L 型）は全計測時間（300 秒）にわたりパルスが良好に得られている。また、ch の違いによるパルス数の絶対値に差はあるものの、パルス数の時間変化の傾向はよく似ている。No.6（円形直管）はパルス数が 15～20 を越すとそのすぐ後にパルス数が急減する傾向が示されている。また、No.4（正方形）は計測時間（300 秒）を通じてパルス数が 4 以下であり流砂量変換の精度が悪いことが推定され、この実験条件のもとでは流砂量測定には使用できないと思われる。

これらの結果からは、今回の実験に用いたハイドロフォンの中では円形 L 型か長方形が良いと考えられるが、バンドパス周波数との関係も含めハイドロフォンの形状についてはさらに検討する必要がある。特に設置する場所によっては直管の使用も大いに考えられるため直管と L 型管の特性の違いについてはより詳しく検討する必要がある。

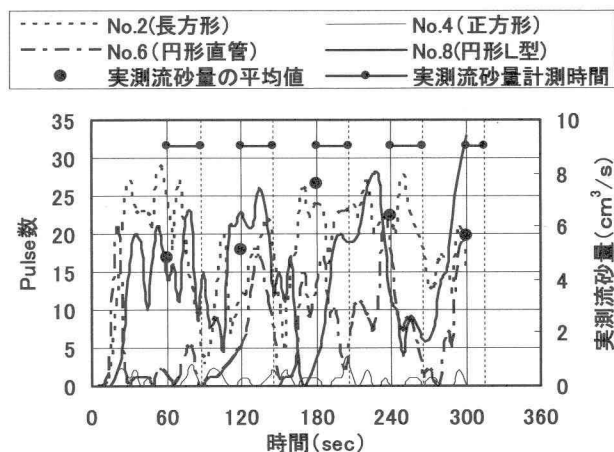


図-3 No.2,4,6,8 のパルス数と No.8 の流砂量の時間変化

b) 一様砂と混合砂の違いによる流砂量とパルス数の応答性

円形L型のハイドロフォンを使用した場合の一様砂と混合砂のパルス数とについて、流量を変えて比較し、流砂量の実測値とともに図-4~6に示す。比較に使用する感度、chは同一のものを使用した。流量20ℓ/sの場合は、混合砂における感度5のch4でパルスが得られなかったためch3のそれと比較した。また、混合砂の場合、複数の感度とchでパルスを得られている。各図中の波線は、通水時間全体を通して最もパルス数が多いケース(感度・ch)を破線で示した。

図-4は流量5.0ℓ/sの場合を示すが、パルスの応答開始時間についてみると、どのchでも混合砂の場合には通水開始から約30秒後、一様砂の場合通水開始から約50秒後となっている。この時間は図-5、6との比較から分かるように流量が多くなるにつれて短くなっている。

またこれらの図からパルスの応答が顕著となつてからのパルス数の時間変化の傾向は、5.0ℓ/sの場合を除いて一様砂の場合も混合砂の場合もほぼ同じであることが分かる。これは掃流力の増大により粒径別流砂から限界掃流力の影響にあまり差がなくなったことによるものであろうと推定している。またパルス数の時間変動は一様砂(図中の太い実線)のほうが大きいことから、混合砂よりも一様砂で流砂量の時間変動が大きいと推定することができるが、実測流砂量からは得られている値がパルス数の計数時間よりはるかに長い時間の平均値であるためここでその問題について議論することはできない。

図-4の流量5.0ℓ/sの場合、通水後半、200sec以降において、混合砂の実験における感度3・ch4(No.13)のPulse数が0に近くなるため同一感度・chであるNo.9との比較ができなくなる。しかし、混合砂でPulse数の合計数が多いケース(No.13の感度3・ch3)との比較を行うと、一様砂とほぼ同じ傾向をもつことが分かる。また、混合砂の実測値との比較から、No.13のch3は実測流砂量の時間変化と傾向がほぼ一致していることが分かる。

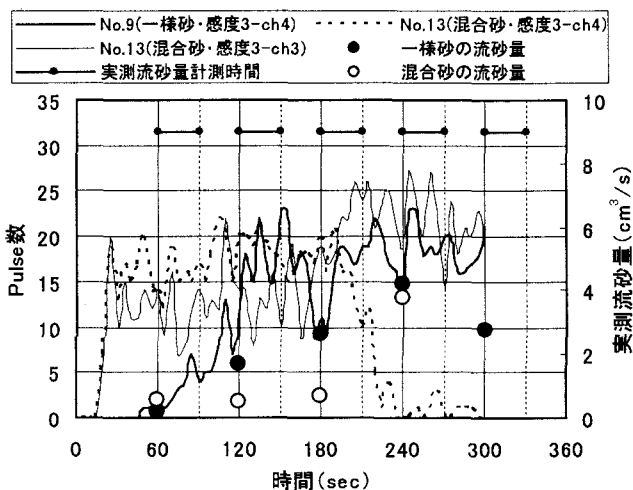


図-4 Pulse数と実測流砂量の時間変化(流量5.0ℓ/s)

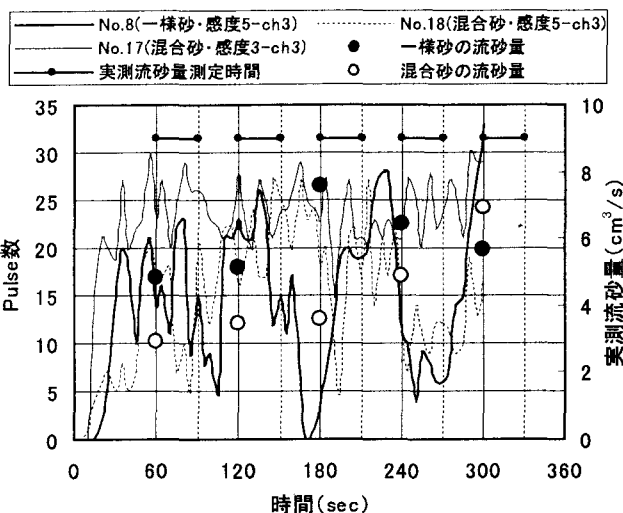


図-5 Pulse数と実測流砂量の時間変化(流量10.0ℓ/s)

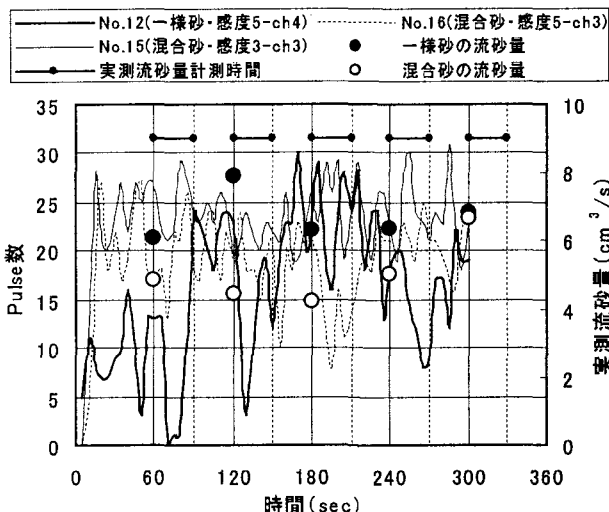


図-6 Pulse数と実測流砂量の時間変化(流量20.0ℓ/s)

c) 急縮部を通過する流砂量とパルス数の応答性

図-7にNo.19, 20の実験結果を示す。パルス数の時間的変化と実測流砂量の時間変化はほぼ一致しており、ピーク時の土砂濃度(1.9%)程度であればハイドロフォンによる流砂量への変換には問題が無いものと考えられる。

急縮部を通過する流砂量は120secから150secにかけて最大となる。この流砂量のピーク時に、砂はある流動層厚で持つて急縮部を流下すると考えられる。そこで、ピーク時の単位時間当たりの実測流量(5,060cm³/s)を用いて移動している砂の層の厚さを式(1)より求めた⁹⁾。

$$\frac{C_s h_s}{d} = \frac{1}{\mu_f} (\tau_* - \tau_{*c}) \quad (1)$$

ここに、 C_s は移動層の平均濃度(0.3とした。)、 d は砂の径、 h_s は移動層の厚さ、 μ_f は砂粒子の動摩擦係数(0.675とした。)、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力である。その結果、流砂の層厚は0.5cmと得られ、スリット底面に設置した金属管の突出高さ、0.5cm

と同程度であることになり十分計測に使用できると考えられる。

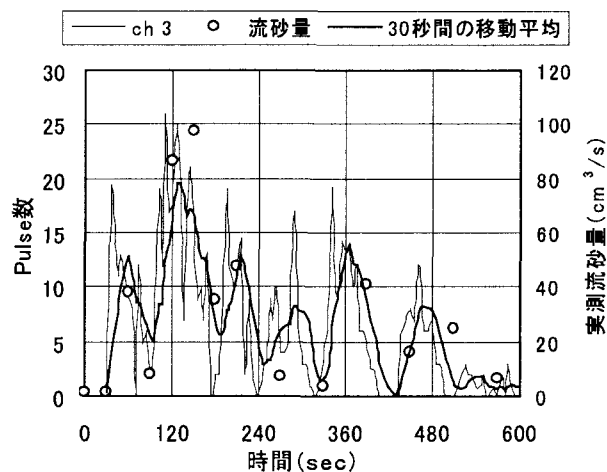


図-7 スリット部からの流砂による Pulse 数と実測流砂量

(2) 模型実験

a) 模型下流端における流砂量と Pulse 数の応答性

図-8, 9 に代表的なパルス数とその時の実測流砂量の時間変化の比較図を示す。図中には流量波形も示した。使用した増幅率は感度 $1 \cdot \text{ch3}$ である。図-8 (実験 A-1) より、実測流砂量とパルス数の時間変化の傾向、並びにピークの時刻がほぼ一致しており、流砂量変化に対するパルス数の応答性は良好であることが示されている。

図-9 (実験 C) は実測流砂量がピークとなる時期においてパルス数が減少している。これは、ピーク前後においては流量が多いため金属管に衝突する砂の速度が増加し、また、流出する砂の粒径も大きくなるため衝突音が大きくなり、ハイドロフォン内での残響音が長く残るため、その間のパルスが得られなくなったためであると推定している。

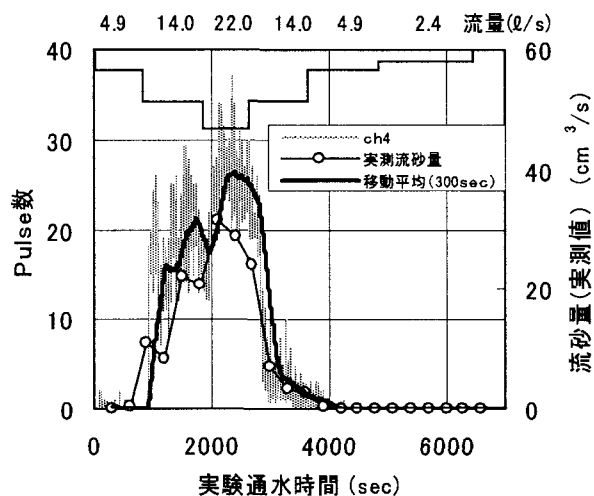


図-8 Pulse 数と流砂量の比較 (実験 A-1)

図-10 に、実験 A-1 の ch3 における各実測流砂量採取時と同じ時刻に記録した Pulse 数との関係を示す。Pulse 数の流砂量に対する関係はほぼ比例していることが分かる。

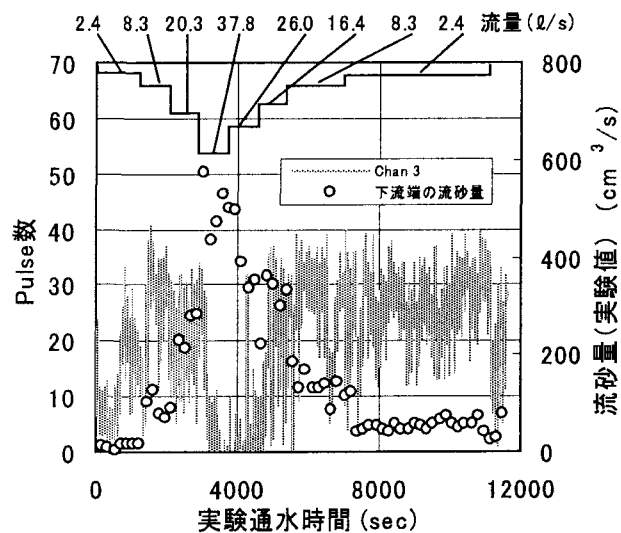


図-9 Pulse 数と流砂量の比較 (実験 C)

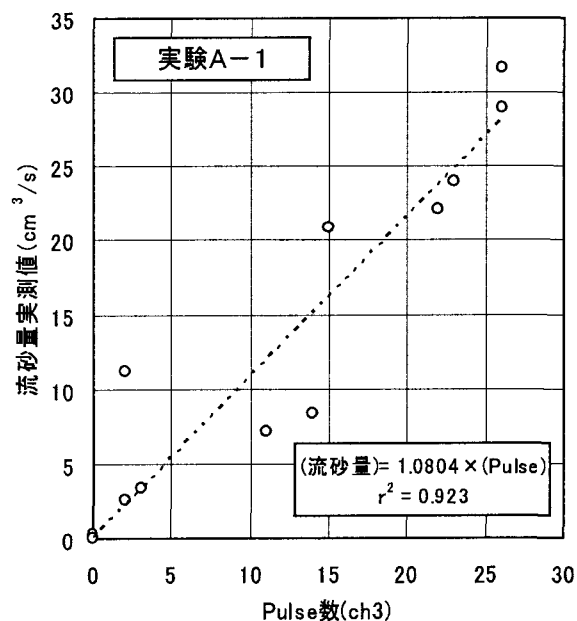


図-10 Pulse 数と実測流砂量の関係 (実験 A-1)

b) Pulse 数の合計数と総流出土砂量の関係

図-11 に ch3 で記録した Pulse 数の合計数と実測による総流出土砂量の関係を示す。Pulse 数の合計数と総流出土砂量はほぼ比例している。なお、実験 C は図-9 に示すように実測流砂量のピーク時において Pulse 数が極端に減少するためこの図からは除いた。

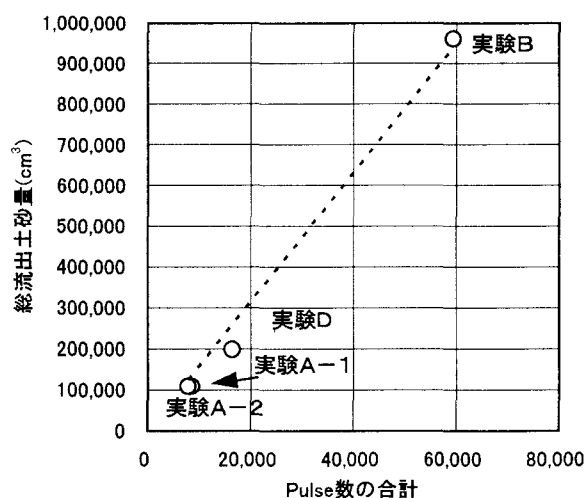


図-11 Pulse 数の合計と実測総流砂量の関係

5. おわりに

ハイドロフォンを実験に使用し、Pulse 数と実測流砂量の相関が良好であることが示され、今後の水理模型実験における流砂量計測の簡素化・省力化の可能性が示された。

また、金属管の断面形状の違いによる Pulse 数の時間変化、一様砂と混合砂の違いによる Pulse 数の時間変化、スリット部のハイドロフォンによる流砂量計測の可能性について検討した。その結果、以下の事項が分かった。

- ①今回の実験の範囲では流砂量計測に使用する金属管の形状としては長方形か円形L型が良いと考えられる。
- ②一様砂も混合砂も平均粒径が同じであれば、ハイドロフォンから得られるパルス数に大きな違いは無い。一様砂ではパルスが得られる感度・ch に制限があるが、混合粒径ではパルスが得られる感度・ch が広い。また、パルス数の応答開始時間については流量が少ないほど一様砂の方ほど長くなる傾向が示された。
- ③スリット部におけるパルス数と実測流砂量の時間変化はほぼ一致し、実験の範囲におけるピーク時の土砂濃度 (1.9%) 程度であればハイドロフォンによるパルス数と流砂量との相関は高い。

Pulse 数から流砂量を推定する精度の向上のためには、流砂量が増加した場合でも確実に衝突音を採取できるような感度の設定と、直管を使用した場合に見られたパルスの応答性低下に対する工夫が必要と考えられる。

最後に、今まで地形模型実験による混合砂を対象とした実験においては、パルス数はほぼ各 ch で採取されていたが、一様砂を対象とした実験ではパルス数を採取できた ch が感度 3 と 5 と 4ch のみのケースが多く、9 ケース中 7 ケースを占めていたことを記しておきたい。これは、一様砂では粒径に対して卓越する感度と ch があり、それらを解析する事が出来れば流砂量の粒度分布の推定も可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 栗原淳一、宮本邦明：音響を利用した流砂量計測装置について、砂防学会誌、Vol.44, No.5, pp.26-31, 1992.
- 2) 桑村貴志、財津知亨、市川嘉輝、齊藤大作、若林英樹、原田輝雄：石狩川における流砂の計測、砂防学会誌、Vol.54, No.5, pp.86-91, 2002.
- 3) 浦真、下井田実、有澤俊治、村松道康、植野利康、横山康二、浜名秀治：与田切川における土砂流出モニタリングについて（その1）、平成13年度砂防学会研究発表会概要集、pp.308-309, 2001.
- 4) Christoph Hegg, Dieter Rickmann : Short-time relations between runoff and bed load transport in a steep mountain torrent, Modeling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes, IAHS Publ. no. 249, pp.317-324, 1998.
- 5) 澤井健二：流砂計測技術の現状と展望、砂防学会誌、Vol.54, No.2, pp.75-84, 2001.
- 6) 水山高久、野中理伸、野中伸久：音響法（ハイドロフォン）による流砂量の連続計測、砂防学会誌、Vol.49, No.4, pp.34-37, 1996.
- 7) 高濱淳一郎、渡部文人、右近則男、安養寺信夫：音響法による流砂計測、砂防学会誌、Vol.54, No.6, pp.59-63, 2002.
- 8) 水山高久、野中理伸、藤田正治：常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.
- 9) 伊藤隆邦、江頭進治：流砂量に及ぼす砂粒子径の影響、水工学論文集、第45巻、pp.649-654, 2001.

(2003. 9. 30 受付)