

一様砂を用いた音響法による流砂の粒径推定のための水路実験

日本工営株式会社 ○後藤健 伊藤隆郭 長山孝彦 田方智 杉山実

1. 結論: 山地河川の掃流砂量の計測センサーとして、ハイドロフォンが最近広く用いられるようになってきた^{1)~3)}。音響法については、1980年代後半~1990年代において、礫重量(粒径の3乗)が音響データの最大振幅値(電圧値)や電圧振幅波形の時間積分値と比例関係にあること^{4)~5)}や、検知率(=衝突数検出数/流下する礫個数)・衝突音の円周モードの最大振幅と衝突礫の運動量に線形関係があること、礫の衝突条件の複雑さによる振幅の出力の粒径依存性と電圧値の波形解析・確率的処理に粒径推定の可能性があること⁶⁾が示されている。栗原ら⁷⁾は、衝突する砂礫の運動量と電圧値の最大振幅値が線形関係にある時に、音響法のカウンターレベルが粒径別の振幅分布と粒径別流砂量の積で表され、粒径別流砂量が原理的には線形代数的に解けることを示した。その後の現地観測^{1)~3)}によりパルス数と水位、観測枡の土砂量、電圧値の波形を用いたデータ整理^{8)~9)}が行われているが、粒径別流砂量の算定には至っていない。ここでは、音響法の当初の研究に立ち返り、流砂の衝突運動量と電圧の最大振幅の線形性の把握とその領域、流砂量の流径別の振幅個数分布、検知率等の値を実験データから求め、粒径別流砂量と粒径を求めるための基礎データを提供する。

2. ハイドロフォンと信号解析システム: 現状手法での流砂の粒径推定が目的であるため、現地設置と同様のシステムを採用した。使用した機器仕様を表1に、システムを図1に示す。マイクロフォンは検知部(0.8m)の片側に配置している。礫の衝突音は電気信号に変換・波形処理され振幅値(電圧値)として出力される。振幅値の取得間隔は、澤井ら¹⁰⁾による取得間隔が1kHz以下である必要性を示した例にならい、最小取得間隔は2kHzとし、取得データの解析で周波数を小さくした。振幅値は、別途6段階(1・4・16・64・256・1024倍)に増幅され、各増幅率によらず閾値(今回は0.1V)を超えるとパルス数が出力・記録される。波形処理回路はハイドロテック製 HT-HP4 を用いた。

3. 空気中での衝突実験: コンクリート上に円管を置き、サドルで両端を固定することで、現地設置状況と同等となるようにした。実験は室内(空中)で円管に質量既知の金属球を、角度45度の木製の滑り台から高さを変化させて流し、衝突させることで実施した。円周モードの振幅値は衝突位置で変化しない⁷⁾ため、衝突位置はマイク位置から一定の約50cm位置とした。衝突角度は、球軌跡が円管中心と通るように、逐一、滑り台の位置を調整した。衝突時の速度は、ハイドロフォン上部に衝突角度とほぼ垂直に設置したハイスピードカメラにより600f.p.s(フレーム/秒)で記録し、画像判読にて算出し、既知の質量と合わせて運動量を求めた。図2に2kHzで取得した衝突時の最大振幅と運動量の関係を示す。衝突粒子の運動量と最大振幅は、運動量が3(g・m/s)以下では線形関係があり、電圧値から推定できる範囲には限界があることが分かる。

4. 水路実験: 使用した水路は、幅0.8m、長さ20mの左岸側が透明アクリル製の固定床の矩形断面開水路(粗度係数0.01[m・s系])である。水路勾配はハイドロフォンがよく設置される砂防堰堤水通し部想定し、約1.5°(=1/38.2)に設定した。水路下流端から3.8mの地点に室内実験と同様に固定したハイドロフォンを上流側は河床から24mm程度(半径に相当)露出させて設置した。ハイドロフォン下流側は、後流の影響と通過粒子の再衝突を避けるために、河床から5mm程度露出させて設置した。流量は電磁流量計(横河電子機器製AXF-200G)を用いて測定した。水深(清水流)はポイントゲージを用いて、ハイドロフォンによる堰上げの影響のない水路下流端から5.9mの位置で測定した。水深(土砂混入時)・粒子移動速度は左岸側から30f.p.sで記録した動画(カメラ位置は水路下流端から4.0m)から解析して算出した。使用した粒径は d_{60} が11.8mm、32.7mm、69.4mmの一様砂(比重2.66)であり、3.3mmの粒径の2、3、3.5乗の大きさを想定した。図3に粒度分布を示す。礫の質量は

表 1 使用機器の仕様

測定管	ステンス管(φ48.6mm t=2mm L=80cm)
共振周波数	軸:0.2kHz 円周:4.5kHz 径:9.3kHz
マイク	エレクトレットコンデンサマイク
周波数特性	200Hz~8kHz
公称インピーダンス	600Ω±30% at1kHz
公称感度	-65.5db±4db at1kHz
プリアンプ特性	ゲイン20倍
波形処理回路	初段アンプ10倍
バンドパスフィルタ	4.5kHz

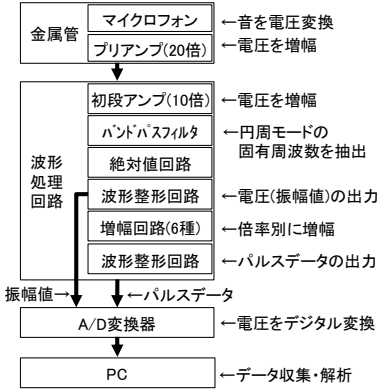


図 1 ハイドロフォンシステム

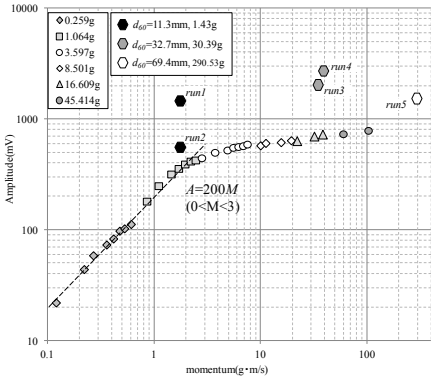


図 2 最大振幅と運動量との関係

表 2 実験ケース一覧

run	Q (l/s)	h (mm)	d ₆₀ (mm)	h/d	u* (m/s)	τ*	c _f
1	120.015	65.000	11.800	5.508	0.129	0.087	0.002
2	60.005	38.000	11.800	3.220	0.099	0.050	0.002
3	90.055	53.500	32.700	1.636	0.117	0.025	0.002
4	120.115	65.500	32.700	2.003	0.130	0.032	0.002
5	120.115	75.000	69.400	1.081	0.139	0.017	0.002

ここに、Q：清水流量、h：水深(土砂混入時)、d₆₀：平均粒径、h/d：相対水深、u*：摩擦速度、τ*：無次元掃流力、c_f：土砂濃度である。
3.3¹=3.3mm、3.3²=10.9mm、3.3³=35.9mm、3.3^{3.5}=65.3mm、3.3⁴=119mm

d_{60} を直径として球置換で算出した。土砂の供給は、ハイ
ドロフォン設置位置での定常状態となるように水路下流
端から 15.8m の位置で行った。実験ケースは表 2 に示す。

(1) 粒径別の振幅個数頻度分布: 図 5 に粒径別の振幅ピー
クの頻度分布を示す。なお、流量による振幅ピークの頻
度分布の差は見られなかったため、流量が異なるデータ
が含まれている。これは本実験では流量の違いによる粒
子移動速度に大きな差が無かったためと考えられる(図
4)。図 5 から、振幅ピークの出現頻度分布が粒径依存す
ることが分かる。例えば、 $d_{60}=11.8\text{mm}$: 0~250mV、 d_{60}
=32.7mm: 250~500、500~700mV、 $d_{60}=69.4\text{mm}$: 500~750mV のようにピー
クが見られる。また、出力値がバラつくのは既往報告⁸⁾の通りであるが、振幅ピー
クの区分で、図 2 で示した関係より電圧値が大きい理由は、粒子の連続衝突
により、音響の残響中に砂礫の衝突があるためである。また、図 2 に水路実験
における最大振幅と運動量をプロットしているが、全粒径において、電圧振幅
値が空中実験の値より大きい理由は、同様の理由である。また $d_{60}=69.4\text{mm}$ が
 $d_{60}=32.7\text{mm}$ より電圧値が小さい理由は、粒径が大きく、同時衝突の礫数が少ない
ためである。図 2 における比較より、電圧値は運動量と線形関係にないもの
の、水理条件に依存するが、粒径でみれば、音響法の線形域の最大値は、約 11mm
の砂礫であり、それよりも大きい砂礫も、電圧振幅値の頻度分布は粒径ごとに
関係があり、粒径の推定が可能であることが伺える。既往水路実験により、ハ
イドロフォンの検知最小粒径が 4mm である報告¹¹⁾もあり、今後、さらに広い
粒径階のデータ蓄積が必要である。

(2) ハイドロフォンの検知率: 図 6 に相対水深と検知率、図 7 に無次元掃流力
と検知率との関係を示す。ここでは既往検討である姫川¹²⁾と与田切川の事例¹³⁾
と同列に比較するために検知率は投入(流下)粒子数に対する増幅率 256 倍のカ
ウント数(パルス数)の割合とした。姫川のデータは現地実験において単一粒径を
対象としたものであり、水深は土砂供給前にメジャーで計測している。与田切
川のデータはトロンメルの観測値で、粒径は直接観測の平均粒径、水深は水位
計の観測結果である。検知率は相対水深・無次元掃流力に対して線形的に現象
することが分かる。なお、無次元掃流力 (τ_*) が 0.2 以上になると、流砂の浮遊
が卓越することが知られているが、 $\tau_*=0.2$ 付近で検知率が大きい幅を持ちはじめ、
 $\tau_* > 1 \sim 2$ 以上では検知率の幅は更に大きくなり、一意的な関係が見出し難い。

5. 結論: 本実験を通じて、現状手法のシステムにおいて、最大振幅と衝突粒
子の運動量との間に線形関係があり、運動量の最大値が約 3(g・m/s)であり、粒
径でみれば、約 11mm の砂礫(水理条件に依存)であること、運動量が線形
域を超えた場合でも、振幅個数頻度分布が粒径によって異なること、検知率
が相対水深・無次元掃流力を用いて、線形的に減少するが、ある範囲ではバ
ラつくことを示した。今後、広い粒径範囲を対象として、音響法の限界・適
用範囲について継続して検討する予定である。

参考文献: 1) 水山ら: 砂防学会

誌, Vol.49, No.4, pp.34-37, 1996, 2) 堤ら: 京都大学防災研究所年報, 第 51 号 B, pp.661-668, 2008, 3) 星野ら: 砂防学会
誌, Vol.56, No.6, pp.27-32, 2004, 4) 澤井ら: 土木学会第 43 回年次学術講演会, pp.324-325, 5) 流砂量測定手法研究会: 砂防学会研究発表
会概要集, pp.133-134, 1988, 6) 谷口ら: 彦根論叢(滋賀大学経済学会), 第 276・277 号, pp.323-346, 1992, 7) 栗原ら: 砂防学会
誌, Vol.44, No.5, pp.26-31, 1992, 8) 水山ら: 砂防学会誌, Vol.61, No.1, pp.35-38, 2008, 9) 鈴木ら: 砂防学会誌, Vol.62, No.5, pp.18-26, 2010, 10)
澤井ら: 砂防学会誌, Vol.54, No.2, pp.75-84, 2001, 11) 小田ら: 砂防学会誌, Vol.60, No.5, pp.66-71, 2008, 12) 神野ら: 砂防学会研究発表会
概要集, pp.242-243, 2010, 13) 草野ら: 砂防学会研究発表会概要集, pp.42-43, 2010。

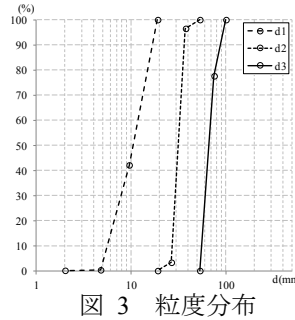


図 3 粒度分布

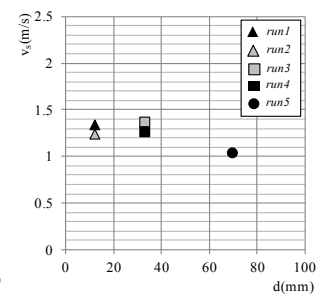


図 4 粒子移動速度

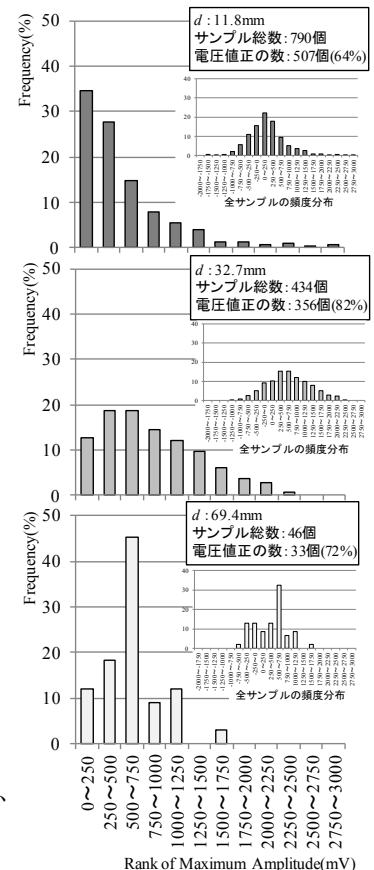


図 5 粒径別振幅ピーク出現頻度分布

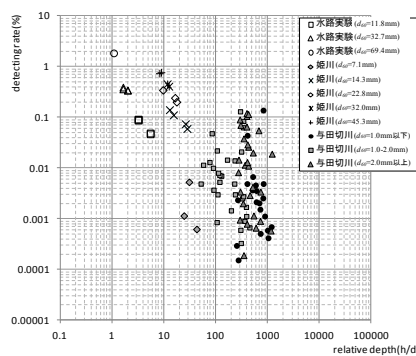


図 6 相対水深と検知率

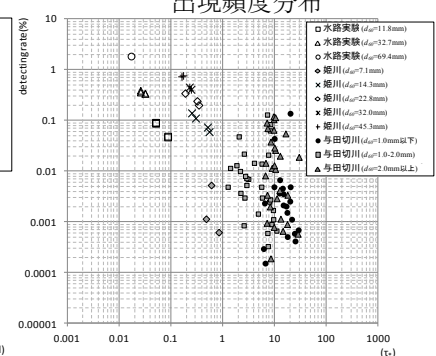


図 7 無次元掃流力と検知率