P-178

数値実験によるハイドロフォンの測定限界に関する検討

○井内拓馬※1・内田太郎※2・桜井亘※2・高原晃宙※3・小松美緒※2・叶正興※1・山本和彦※1
※1 株式会社建設環境研究所，※2 国土技術政策総合研究所土砂災害部，※3 水管理・国土保全局砂防部

1. はじめに

山地河川における掃流砂の計測手法の 1 つとして，ハイドロフォンを用いた手法の技術開発が進められており。全国的な観測が実施されている。

一方で，ハイドロフォンによる流砂量観測に関しては，いくつかの課題が指摘されており，筆者らは，「流水ノイズの影響による測定限界」と「非衝突の影響」に着目し，室内水路実験により検討を行っており [1)]，測定限界については，d=2.0 mm の土砂はほぼ 100%の衝突を検知できる可能性があることを示した。

一方で，室内実験では 10 数 cm より大きな水深を確保することが難しいなど施設上の制約により，小さな粒径を多量に流下させることができず，限られた条件下での検討となっていた。ハイドロフォンは土粒子の衝突を音響波形として記録するものであり，衝突音の音響波形は衝突する粒子数が増加すればするほど増幅する。従って，小粒径の衝突による音響波形でも，流水ノイズを上回ると想定され，計測限界は粒径ではなく流砂量により決まると推測される。

そこで，本研究では，モンテカルロシミュレーション（以下，数値実験）により粒径の小さな土粒子が多数衝突した場合の音響波形を再現・推定し，流水ノイズの音響波形と比較することで，ハイドロフォンの測定限界について検討した。

2. 方法

2.1 数値実験について

本研究で用いるモンテカルロシミュレーションは，既往研究 [1)]と同様のもので，土粒子 1 個の衝突による音響波形（以下，個別衝突波形）を単位時間当たりに任意の回数 N だけ重ね合わせることで，N 個衝突によるの波形データを合成するものである。

衝突音の再現は，個別衝突波形（流水ノイズ無し）を N 個重ね合わせたものに，流水ノイズを加えることにより行った。個別衝突波形（流水ノイズ無し）は,『個別衝突波形の音響波形の振動時間は粒径に依存せず、音圧値や音圧積分値は土粒子の体積に比例する』という知見[例えば 1)]を踏まえ，既往研究 [2)]で計測された比較的大きな粒径の個別衝突波形を体積比（粒径の 3 乗）で除することで用意した。結果的に，用意した個別衝突波形は流水ノイズの影響は相対的に小さなものとなった。

また，個別衝突波形および流水ノイズそれぞれについて，電源やセンサー，ロガーに起因するノイズを除去するため，ハイパスフィルター（サンプリング周波数 Fs=1.0 kHz，フィルター強度 Q=10）により処理した。

2.2 数値実験の検証について

数値実験の検証は，既往研究 [2)]における室内実験での小粒径（d=1.4mm, 2.5mm）の音響波形（**表－1** 参照）を再現することにより行った。

なお，数値実験と同様，検証対象とする室内実験の音響波形についても，ハイパスフィルターにより処理した。

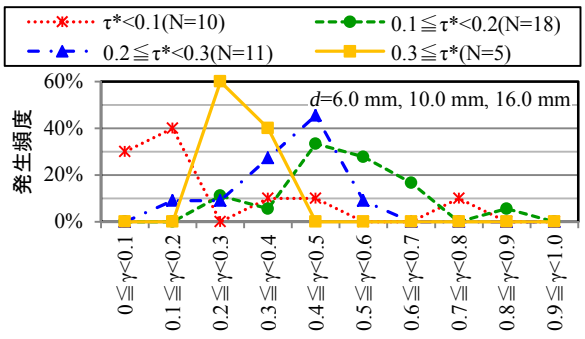
また，室内実験の再現性の確認においては，数値実験と室内実験それぞれの音響波形について，サンプリング周波数 Fs=4.5 kHz，フィルター強度 Q=20）により処理した上で，音圧波形に変換し，音圧値の発生頻度分布を比較することとした。

なお，室内実験では，水路を流下させた土砂量は既知であるが，そのうち，どれだけ金属管に衝突したかは不明である。そこで，既往研究 [2)]で得られた衝突率γの頻度分布（**図－1** 参照）を参考にγ=0.05～0.25 として試行錯誤的に設定し，衝突粒子数および土砂量を設定した。ここで，（衝突粒子数 N）＝γ（流下粒子数 N’）

表－1 数値実験の検証対象とした実験ケース [2)]

再現 Case	平均粒径 d[mm]	勾配 I[°]	流量 Q[L/s]	流下土砂量 Q_s’[cm^3/s]	流下粒子数※ N’[s^{-1}]
1	1.4	5	20	50	34,800
2	1.4	5	20	200	13,9200
3	2.5	3	40	18	2,202
4	2.5	5	20	37	4,561
5	2.5	5	40	151	18,520

※（流下粒子数 N’）＝（流下土砂量）／（平均粒径の体積）



図－1 既往検討 [2)]における衝突率の推定結果

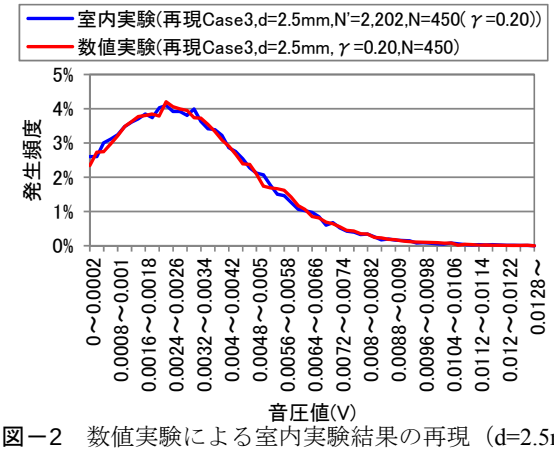
2.3 測定限界の検討について

2.2 で検証した数値実験手法により，粒径の小さな土粒子が多数衝突した場合の音響波形を推定した。推定した粒径および衝突粒子数を**表－2** に示す。

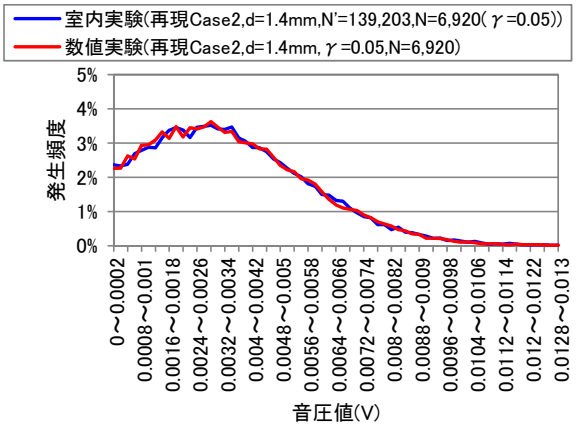
表－2　数値実験により推定した音響波形の諸元 [2)]

再現 Case	平均粒径 d[mm]	衝突土砂量 Q_s[m^3/s]	衝突粒子数 N[s^{-1}]	再現 Case	平均粒径 d[mm]	衝突土砂量 Q_s[m^3/s]	衝突粒子数 N[s^{-1}]	再現 Case	平均粒径 d[mm]	衝突土砂量 Q_s[m^3/s]	衝突粒子数 N[s^{-1}]
1	0.5	2.5×10^{-7}	13,9200	6	0.75	2.5×10^{-7}	2,260	11	1.0	2.5×10^{-7}	960
2	0.5	5.0×10^{-7}	2,202	7	0.75	5.0×10^{-7}	4,530	12	1.0	5.0×10^{-7}	1,910
3	0.5	1.0×10^{-6}	4,561	8	0.75	1.0×10^{-6}	11,320	13	1.0	1.0×10^{-6}	4,770
4	0.5	2.5×10^{-6}	18,520	9	0.75	2.5×10^{-6}	22,640	14	1.0	2.5×10^{-6}	9,550
5	0.5	5.0×10^{-6}	152,790	10	0.75	5.0×10^{-6}	45,270	15	1.0	5.0×10^{-6}	19,100

※（流下粒子数 N'）＝（流下土砂量）／（平均粒径の体積）



図－2　数値実験による室内実験結果の再現（d=2.5mm）



図－3　数値実験による室内実験結果の再現（d=1.4mm）

3. 結果

3.1　数値実験の検証結果

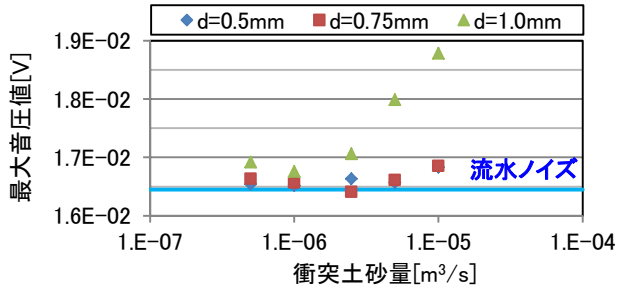
2 で示した方法により，既往研究の室内実験での音響波形を再現した結果の一部を**図-2**，**図-3** に示す。図より，d=2.5mm，d=1.4mm それぞれのケースについて，数値実験により，良好に再現できているといえ，本数値計算手法の妥当性が確認された。

しかし，数値実験を実施する際には，衝突率を試行錯誤的に設定して衝突土砂量（衝突粒子数）を設定する必要があるため，衝突土砂量の推定には課題がある。

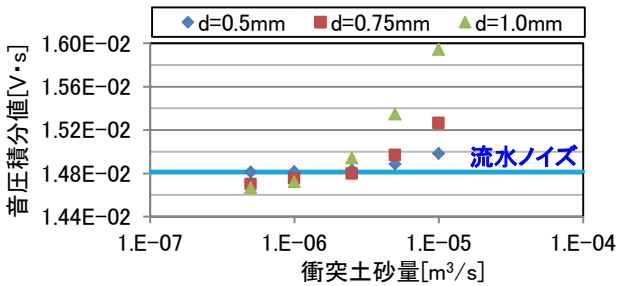
3.2　測定限界の検討について

数値実験により推定した音響波形にから最大音圧値と音圧積分値を算出した結果を**図-4**，**図-5** に示す。同図には，数値実験時に設定した流水ノイズの最大音圧値と音圧積分値も示した。

図-4 より，最大音圧値は，d=0.5mm, 0.75mm は衝突土砂量が多くなっても大きな変化はみられないが，d=1.0mm は，大きな変化が見られた。



図－4　数値実験による流砂量と最大音圧値の関係



図－5　数値実験による流砂量と音圧積分値の関係

また，**図-5** より，音圧積分値は，衝突流砂量が 1.0×10^{-6} m^3/s より少ないときは，流水ノイズより小さくなっているが，衝突流砂量が 1.0×10^{-6} m^3/s より多くとなると，流水ノイズを上回り，検知できると考えられるが，その閾値は粒径により少し違いがある。

4. まとめ

本研究では，個別衝突波形と流水ノイズを重ね合わせるモンテカルロシミュレーションにより，室内実験での衝突波形を再現できることを示した。また，その方法を用い，小粒径の土粒子が多数衝突した場合の音響波形を推定し，流水ノイズの音響波形と比較することで，ハイドロフォンの測定限界流砂量について検討した。なお，今回の検討は一様砂を対象に行ったものであるため，混合砂に対しての検討は引き続き行う必要があるが，本検討により，小粒径の土砂が多量に衝突した場合，ハイドロフォンによりその衝突を検知できることが示された。

参考文献

1）鈴木拓郎・内田太郎・岡本敦・高橋健太・山下伸一郎・小菅尉多・福本晃久：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証，砂防学会誌，Vol.66，No.1，pp.4-14，2013

2）井内拓馬・内田太郎・吉村暢也・鶴田謙次・田中健貴・蒲原潤一・桜井亘：ハイドロフォンを用いた掃流砂観測における流水によるノイズ・非衝突の影響に関する水路実験，砂防学会誌，Vol.69，No.3，pp.4-14，2016