

土砂水路実験施設におけるハイドロフォンの ノンフィルタデータ解析

DATA ANALYSIS ON NON-FILTERED DATA OF HYDROPHONE USING SEDIMENT-CHANNEL EXPERIMENTAL MODEL

手計太一¹・磯村慎吾²・鶴田謙次³・吉村暢也³

Taichi TEBAKARI, Shingo ISOMURA, Kenji TSURUTA and Nobuya YOSHIMURA

¹正会員 博(工) 富山県立大学大学院准教授 工学研究科環境工学専攻 (〒939-0362 射水市黒河5180)

²正会員 学士 国土交通省中部地方整備局岐阜国道事務所 (〒500-8262 岐阜市茜部本郷1-36-1)

³正会員 株式会社コルバック (〒113-0034 文京区湯島2-22-10 後藤ビル3階)

To clarify the characteristics of non-filtered data of hydrophone, hydraulic experiment was carried out using actual gravel of the Sho River and the Oyabe River in sediment-channel experimental model. Sound pressure data from the hydrophone was analyzed using non-filtered data which sampling frequency was 100 kHz.

As a result of hydraulic experiment, the relationship between maximum sound pressure data and mass and momentum of gravels had large variations. It was too difficult to estimate mass and momentum of gravel using only non-filtered data of the hydrophone. As a result of multiple regression analysis, multiple regression function using maximum sound pressure and dominant frequency of NF data, water depth and water velocity setting as explanatory variables could be most satisfactorily reproduced experiment data.

Key Words : *Hydrophone, non-filter data, data analysis, multiple regression analysis*

1. はじめに

河川では大小様々な土砂は、浸食や堆積を繰り返すことで河床を形成する主要要素となり、出水の際には河川災害を引き起こす原因となる¹⁾。そのため、移動する土砂量を定量的に把握することは河川管理をする上で極めて重要である。また、昨今においては気候変動に伴い集中豪雨が増えていることから、水災害軽減の観点からも、これまで以上に移動土砂量の把握が必要とされる²⁾。

河道を形成する主要因である掃流砂は、直接採取による事後的な観測手法を除き、確立された観測手法がなく、様々な観測手法が研究されている。そのなかで、河床を移動する掃流砂の計測手法の一つであるハイドロフォンの利用が近年多くなっている。ハイドロフォンによる土砂計測には、連続的な計測が行えることや、装置が簡易的であるという利点がある。しかし、観測値にばらつきが大きく、掃流砂のような移動土砂を定量的に精度良く測定することは容易でない。そのため、観測精度の向上とともに利用可能範囲の明確化が急務である。

既往研究において、水山ら(1996)は、音響式流砂量計であるハイドロフォンを用いた室内水路実験を行っている。実験水路の下流端にハイドロフォンを設置し、粒径約1 mmの砂礫を水路に敷いて、流砂のない状態を含む4段階の流量を与え、ハイドロフォンに衝突する砂礫の音を記録した。その結果、流砂量が多いか少ないかの傾向を知ることが可能であることを明らかにした。また、ハイドロフォンを実河川に設置し、いくつかの出水において観測を行った。その結果、出水の前半に流砂が多く、出水の後半には同じ流量でも前半ほど流砂が多くないという傾向があることを明らかにした³⁾。

鈴木ら(2010)は、音響法による流砂量計測手法として音圧値に注目し、流砂量と音圧値の関係を水路実験により検証を行った。その結果、粒子数が少ない条件では流砂量と観測される最大の音圧値は比例関係にあるが、粒子数が多い条件では上述の比例関係よりも小さな値で分布することが明らかになった。そこで、その比例関係による期待値に対する実際の音圧値の割合を検出率とすると、粒子数が多いほど検出率が低下するという結果を得ている⁴⁾。また、ハイドロフォンによる掃流砂量の定量

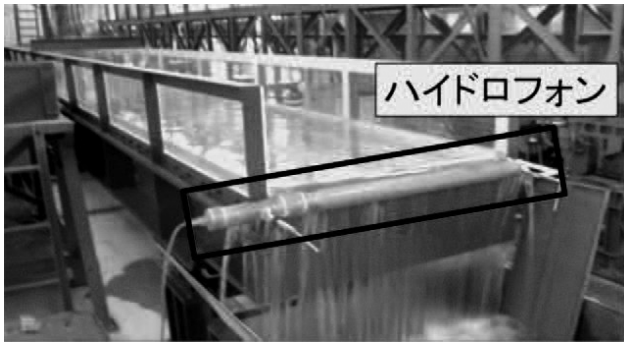


図-1 本研究で用いた実験水路とハイドロフォン

的な評価を行うには、全掃流砂量に対するハイドロフォンへの衝突率、つまりハイドロフォンによる流砂の捕捉率に関する問題を検討する必要もある。

本研究では、ハイドロフォンによる音響法を採用し、土砂実験水路を用いて、実河川を流下する砂礫粒子の音圧値の測定を行う。その測定結果から、砂礫粒子の粒径や質量、あるいは流下の際の運動量とハイドロフォンによる観測値から流砂量を定量的に測定する方法を開発すること、ハイドロフォンによる観測値のばらつきの要因分析を目的とする。既往研究の多くは、データ量の膨大さからフィルタ後のデータ解析に主眼があるため、土砂量推定値の精度向上に寄与する要因分析が不足しているのが実情である。以上を鑑み、本研究では、得られた音圧データに既存のフィルタを掛けずにノンフィルタデータとして解析するとともに、ハイドロフォンのみによる砂礫の質量や運動量の推定の限界について議論する。

2. 砂礫流下実験

(1) ハイドロフォン

図-1に本研究で使用したハイドロフォンの写真を示す。本研究で用いたハイドロフォンは、直径48.6 mmの鉄管内にマイクロフォンが封入されているもので、流水に対して垂直に実験水路の河床に設置した。実験では、試料として用いる砂礫がハイドロフォンのセンサー部に衝突した際に発生する衝突音の強さや数をデータロガーに記録する。こうして取得した音圧データを解析することで流砂量を推定する。

(2) 実験方法と実験条件

ハイドロフォンで観測される砂礫の衝突音と砂礫の粒径や質量、水中を流下する際の運動量との関係を把握するために、実験水路を利用した砂礫流下実験を行った。

実験水路は全長6 m、幅80 cmの可変勾配式である。表-1は実験条件である。なお、case10,11については後述する。水路勾配は1/60 - 1/10の範囲で変化させた。この実験水路の河床の下端に長さ1 mのハイドロフォンを設置し、一定の流量の水を流し、試料である砂礫を投入し設置し

表-1 砂礫流下実験の実験条件

実験case	case1	case2	case3	case4	case5	case6
サンプル数	50	48	47	50	50	50
流量(L/min)	2000	2000	2000	1000	1000	1000
河床勾配	1/60	1/20	1/10	1/10	1/20	1/60
水深(cm)	2.92	1.85	1.3	0.85	1.21	1.85
流速(m/sec)	1.427	2.252	3.205	2.451	1.722	1.126
フルード数	2.66	5.22	8.96	8.49	5.01	2.64
実験case	case7	case8	case9	case12	case13	
サンプル数	240	50	100	200	200	
流量(L/min)	2000	1000	1000	2000	2000	
河床勾配	1/20	1/20	1/20	1/30	1/20	
水深(cm)	*	1.3	1.5	2.69	2.35	
流速(m/sec)	*	1.603	1.389	1.549	1.773	
フルード数	*	4.49	3.62	3.02	3.69	

* 水深を計測していないため、値は不明。条件はcase2と同じ。

たハイドロフォンと衝突させる実験を行った。

実験で用いる砂礫試料は予め長径、短径、質量を計測してある。流量は条件に応じて毎分1000 Lと2000 Lを一定に与えた。流速は電波流速計、水深はポイントゲージを用いて直接測定した。衝突音はサンプリング周波数100 kHzで記録し、計測時間は10秒間及び5秒間とした。ハイドロフォンに衝突する直前の1 mの区間において、砂礫の通過時間を測定し、砂礫の流下速度を求め、運動量を算出した。

3. 実験結果

(1) 最大音圧に関する考察

砂礫の流下実験で得られた観測値の音圧時系列データから最大値を抽出し、これを最大音圧値とした。

図-2及び図-3は、それぞれ砂礫の質量及び運動量と最大音圧値との関係である。図-2より、質量の増加に伴い最大音圧値が大きくなる傾向があるが、粒径と最大音圧値の関係と同様、一様な増加ではなく、同程度の質量の砂礫試料の最大音圧値を比較しても最大音圧値が数倍異なる結果もあり、観測される最大音圧値に大きなばらつきが認められる。また、図-3より、運動量と最大音圧値との関係においては、ある程度の比例関係が認められるが、質量と最大音圧値の関係と同様に、運動量に対する最大音圧値のばらつきが大きい。砂礫の粒径や質量、運動量に対する最大音圧値がばらつく要因として、ハイドロフォンへの砂礫の衝突状況が異なっていることが考えられる。球形のガラスビーズを用いた既往研究⁴⁾と比較すると、実際の砂礫では質量・運動量と最大音圧の間に系統的な関係を導くことが難しいことがわかる。実験中の観察では、ハイドロフォンへの衝突形態が多様であった。

ここで、質量と最大音圧と長径の関係(図-4)、運動量と最大音圧値と長径の関係を示す(図-5)。それぞれ、砂礫流下実験case1-9,12-13の結果である。いずれも、それ

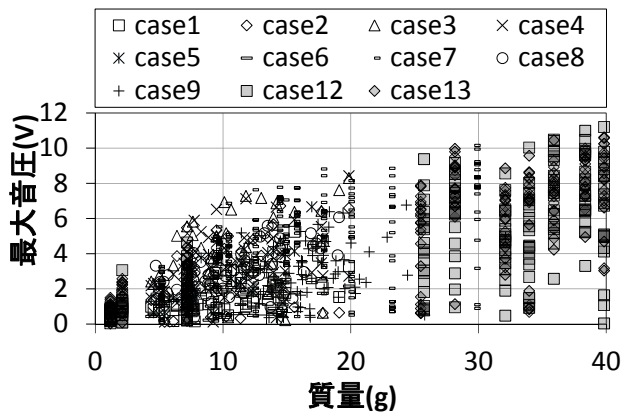


図-2 試料の質量と最大音圧値の関係

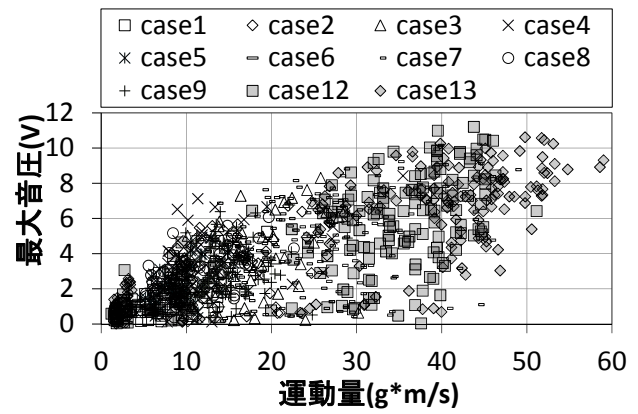


図-3 試料の運動量と最大音圧値の関係

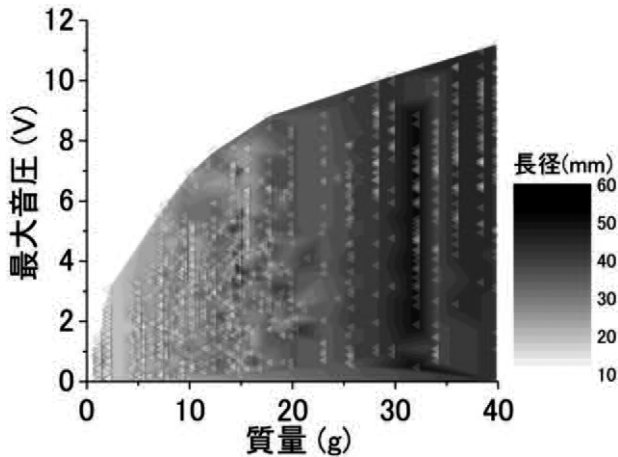


図-4 砂礫流下実験における質量、最大音圧値、長径の関係

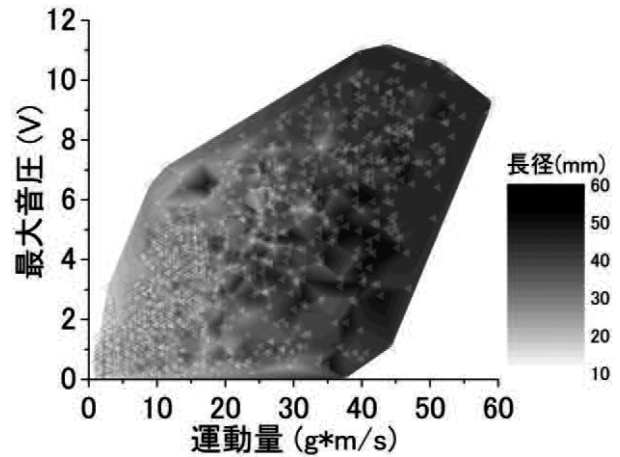


図-5 砂礫流下実験における運動量、最大音圧値、長径の関係

ぞれの関係に系統的な傾向は認められなかった。粒径の値が直接的に最大音圧値のばらつきに影響していないと考えられる。

以上のように、質量や運動量と最大音圧との関係におけるばらつきの原因について、全ての試料条件や水理条件から検討した結果、全てにおいて明瞭な関係は認められなかった。

(2) 音圧データの周波数特性とバンドパスフィルタ

ここでは、本実験における音圧データの周波数特性を明らかにし、特に既往研究では明らかになっていない射流状態(表-1の実験条件を参照)における周波数特性を明らかにする。周波数解析にはFFT解析を利用した。

図-6は砂礫流下実験で得られた音圧データの一例である。また、図-7は砂礫流下実験の音圧データとハイドロフォンに流水だけ当てて得られた音圧データの両者について周波数解析した結果である。図-7から、約1 kHz以下の周波数における振幅が両者とも同程度であることから、射流状態における流水による音圧データの周波数特性は約1 kHz以下にあると考えられる。

また、砂礫の衝突音を含む音圧データの周波数解析において、振幅が3.5 kHz付近で最も大きく卓越している。既往研究において、ハイドロフォンの管の円周方向にお

ける固有振動数を算出する次式が得られている⁵⁾。

$$f = 0.298(c/a) \quad (1)$$

ここで、 f はハイドロフォンの固有振動数、 c は音速、 a はハイドロフォンの管の半径である。

本研究で使用しているハイドロフォンの管の直径は48.6 mmであるため、固有振動数は約4.2 kHzとなる。これらのことから、実験で取得する音圧の周波数特性は、式(1)によって求められた約4.2 kHz付近である。

本研究では、 4.2 ± 1 kHzの周波数帯(以下、3.2-5.2 kHz)でのバンドパスフィルタ(以下、BPF)を用いて音圧データのフィルタ処理を施し、ノンフィルタ(NF)データと比較を行った。

砂礫流下実験で取得した音圧データを用いたBPFデータとNFデータの最大音圧値と砂礫の運動量の比較を行った(図-8)。本図から、BPF処理後の最大音圧値はNFデータの最大音圧値よりも小さい。また、NFデータの場合と同様に、運動量に対する最大音圧値のばらつきが生じている。実験水路を用いた砂礫流下実験であっても、ハイドロフォンへの衝突形態が多様であり、最大音圧値のみで土砂量を推定することは難しい。従って、砂礫が流下する水深や流速等を考慮する必要があると考えられる。

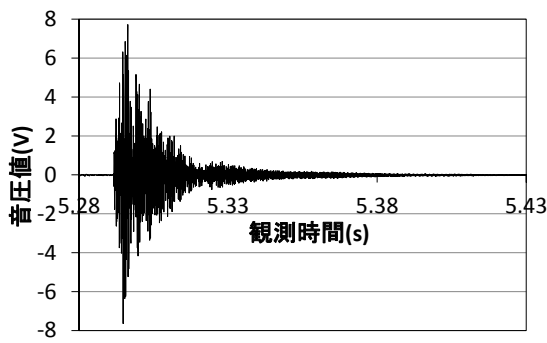


図-6 砂礫流下実験で得られた音圧データの一例

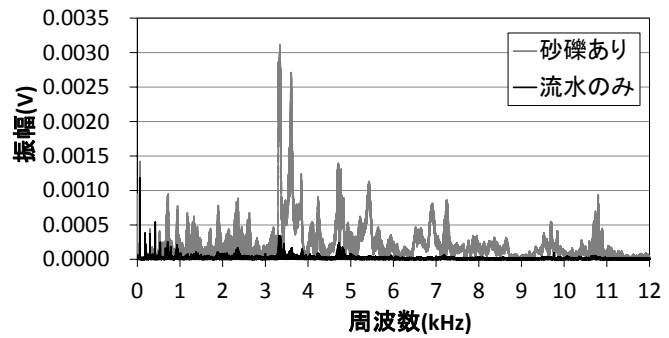


図-7 ハイドロフォンで観測された音圧データの周波数解析結果

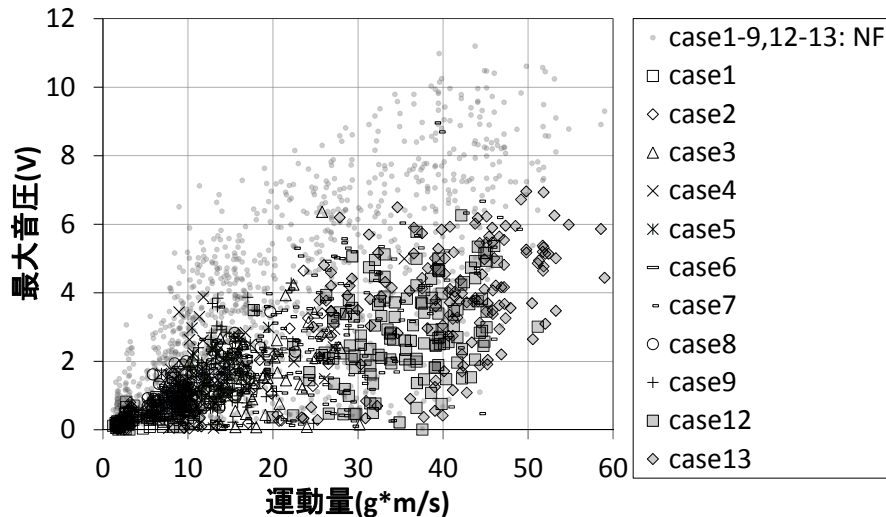


図-8 砂礫流下実験における運動量と3.2-5.2 kHzのBPFデータの最大音圧値の関係

表-2 自由落下実験の実験条件

実験case	case10,11
試料の種類	8
繰り返し回数	10
落下高さ(m)	0.1, 0.5, 1.0
サンプル数	238

4. 自由落下実験

前章までのように、砂礫試料の衝突形態が音圧データのばらつきに大きく影響していることが明らかになったため、本章では、衝突形態を統一にするため砂礫の自由落下実験(case10, 11)による音圧データの解析を行った。

(1) 実験方法と実験条件

表-2に実験条件を示す。自由落下させる高さを0.1 m, 0.5 m, 1.0 mの3種類とし、8種類の試料 (0.9656 g, 4.9971 g, 10.2533 g, 19.8568 g, 42.9802 g, 61.4560 g, 75.9313 g, 101.2494 g) を各試料につき10回ずつハイドロフォンへ自由落下させる実験を行った。また、サンプリング周波数は100 kHz, 計測時間は10秒間で行った。なお、0.9656 gの試料は実験中に試料を失ったため、高さ1.0 mでの実験の繰り返し数が8回となった。

(2) 実験結果

砂礫流下実験の実験結果と同様に、自由落下実験で取得した音圧データに対しても同じ3.2-5.2kHzでのBPF処理を施し、運動量とフィルタ処理後の最大音圧値を比較

した。図-9は自由落下実験における砂礫の運動量とNFデータ及びBPFデータの最大音圧値の関係である。まず、観測されたNFデータの最大音圧値が約10～12 Vの間で一定の値に収束している。これは、ハイドロフォンの金属管と砂礫の衝突の際に出る衝突音の大きさには、物理的な限界があるためである。本実験において、11.32 Vで最大音圧値が一定となった。

11.32 Vになるまでの間では、ばらつきはあるものの、運動量と最大音圧値の間には比例関係が認められる。

(3) 実験結果への近似曲線の適用

自由落下実験における運動量と最大音圧値の関係に対して非線形最小二乗法を用いた曲線近似を行い、両者の関係の定式化を試みた。

金属管の音圧値の限界を考慮して、以下の2式を用いて検討した。

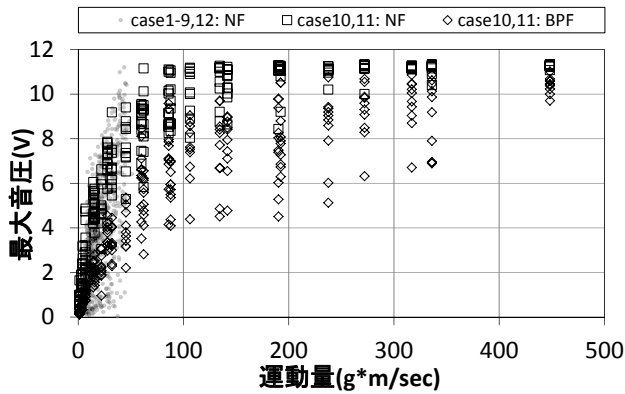


図-9 自由落下実験における運動量とNF及びBPFデータの最大音圧値の関係

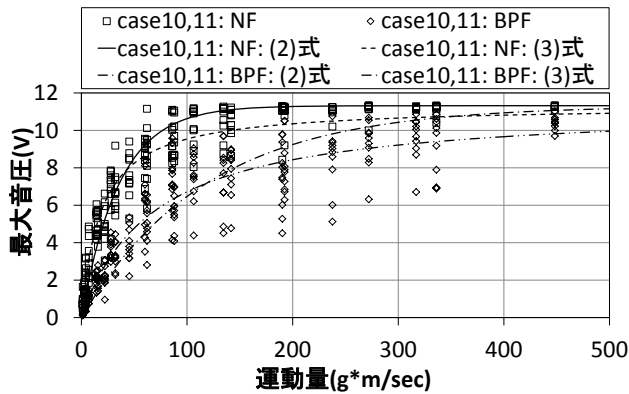


図-10 自由落下実験における実験結果と実験結果に対する近似曲線

$$y = a(1 - e^{-bx}) \quad (2)$$

$$y = \frac{a \cdot x}{c + x} \quad (3)$$

ここで、 y は最大音圧値、 x は運動量、 a 、 b 、 c は定数である。上式における変数 y は係数 a に漸近する特徴を持っているため、本実験のハイドロフォンの限界最大音圧値の11.32を a とした。表-3及び図-10は、自由落下実験における運動量と最大音圧値に対して非線形曲線近似を行った結果である。平均的には実験結果を良く再現できている。

上述で求めた近似曲線の精度を検証するために、case12の実験で取得したNF及びBPFデータの最大音圧値を入力し、運動量を算出した。その結果を図-11に示す。case12のBPFデータの最大音圧値を式(2)に入力して求めた運動量の計算値と実測値の決定係数は約0.8と精度が高い。NFデータは式(2)、(3)ともに精度が低い。実験値のばらつきが大きいため、これ以上の精度改善は困難であると思われる。

5. 重回帰式による砂礫の運動量の推定

表-3 自由落下実験における運動量とNF及びBPFデータの最大音圧値に対して非線形曲線近似を行った結果

近似式	係数b	係数c	決定係数
case10,11: NF, (2)式	0.27990	——	0.9099
case10,11: NF, (3)式	——	18.64087	0.9289
case10,11: BPF, (2)式	0.00848	——	0.8220
case10,11: BPF, (3)式	——	68.47606	0.8770

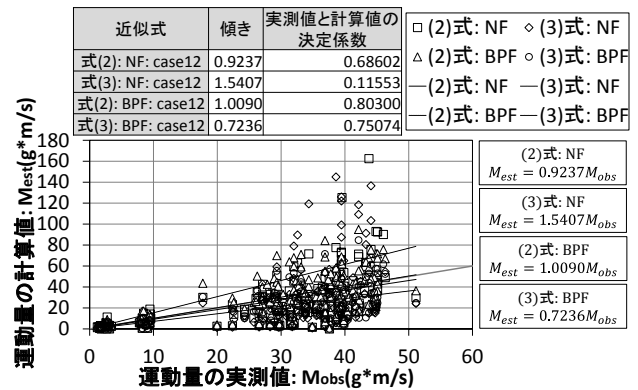


図-11 式(2)及び(3)に対してcase12の実験で得られた最大音圧値から算出した運動量と実測値との比較

(1) 重回帰分析

砂礫流下実験において、水路を流下する土砂の移動形態やハイドロフォンへの衝突形態が多様であるために、ハイドロフォンによる観測値にばらつきが生じ、観測値のみからでは土砂量を推定することが困難であると分かった。そこで、観測値である最大音圧値のみでなく、水深や流速といった現場で直接測定できる水理条件の数値を変数として重回帰分析を行い、砂礫の運動量を精度良く推定するための要素を分析した。

重回帰分析を行うに当たり、重回帰式を導出するために砂礫流下実験case1-9,13の実験データを使用した。また、導出した重回帰式の精度を検討するために、case12の実験データを使用した。

使用する説明変数は、NF及びBPFデータの最大音圧値、卓越振幅、卓越周波数、水深、流速である。これは、ハイドロフォンでの観測値と解析値、そして実際の現場で計測可能な水理量として選択した。

重回帰分析における変数同士の多重共線性を避けるため、内部相関を検討した結果、NFデータの最大音圧値とBPFデータの最大音圧値及び卓越振幅は同じ重回帰式の中で変数として使用できないことが分かった。

表-4 重回帰分析の結果(決定係数上位6位)

式番号	最大音圧	BPF 最大音圧	卓越振幅	BPF 卓越振幅	卓越 周波数	BPF 卓越周波数	水深	流速	実測値と の比較の 傾き	実測値と 計算値の 決定係数
重回帰式01	3.50698				-0.00039		411.2391	0.63159	0.87514	0.90018
重回帰式02	3.56581				-0.00035		448.7374		0.89067	0.89928
重回帰式03	3.40824					0.000817	214.6471		0.81671	0.89157
重回帰式04	3.44523					0.00119	202.6977	-0.7011	0.82270	0.89156
重回帰式05	3.47047						342.9203	0.19352	0.84613	0.89126
重回帰式06	3.49108						357.5545		0.85222	0.89125

(2) 重回帰式の作成と砂礫の運動量の推定

表-4は重回帰分析の結果，決定係数が上位6位までの結果を示している．また，図-12は表-4で得られた重回帰式を用いてcase12の運動量を推定した結果である．図-12と表-4から，重回帰式01の決定係数が0.90，傾きは0.87となり1に非常に近く，目的変数であるcase12における運動量を良く説明できていると言える．

本研究では，砂礫の運動量を推定するには，NFデータの最大音圧値，NFデータの卓越周波数，水深及び流速の値を用いることが適切であると考えられる．

しかし，図-12から分かる通り，全ての重回帰式の結果において，運動量が0-10 g*m/sの範囲において計算値が実測値に対して過大評価している．

6. 結論

本研究では，実験水路にハイドロフォンを設置し，実際の河川の砂礫を試料として用いて，音圧データをノンフィルタで解析した．

その結果，既往研究と同様に砂礫の質量や運動量の増大にハイドロフォンの最大音圧値も増大するという傾向が認められた．しかし，同じの質量や運動量に対して，最大音圧値は数倍ほどのばらつきが生じた．ハイドロフォンのノンフィルタデータのみからでは砂礫の質量や運動量を推定することは極めて困難である．

また，ハイドロフォンへの衝突形態を多様に行っていると考えられる固有の砂礫試料条件や水理条件では，上述のばらつきを説明することはできなかった．

次に，自由落下実験の結果，バンドパスフィルタを用いることによって，最大音圧値から砂礫の運動量を推定できる可能性があった．

最後に，ハイドロフォンで得られた音圧値や水理条件を用いて，砂礫試料の運動量を推定する重回帰分析を行った．その結果，NFデータの最大音圧値，NFデータの卓越周波数，水深及び流速の4要素を変数として用いた重回帰式が最も実測値を再現できていた．しかしながら，運動量の実測値が小さい範囲において，計算値が過大評価となることが分かった．そのため，この重回帰式を用いて運動量を推定する場合，実測値が小さい範囲に

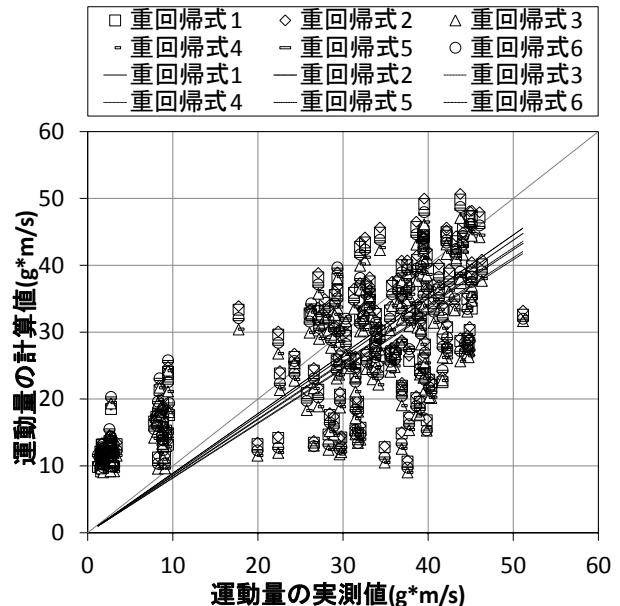


図-12 導出した重回帰式を用いて算出した運動量の計算値と実測値を比較した結果

において計算値が過大評価にならないような補正が必要であると考えられる．

理想的な条件下でハイドロフォンの実験を行ったが，ノンフィルタの音圧値から土砂量を推定することは困難であることが示された．しかし，バンドパスフィルタの使用や水理・試料の条件を考慮することによって，精度が向上する可能性があり，今後の検討課題としたい．

参考文献

- 1) 福岡捷二, 長田健吾, 安部友則: 石礫河川の河床安定に果たす石の役割, 水工学論文集, 第52巻, pp.643-648, 2008.
- 2) 秋本嗣美, 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価, 水工学論文集, 第52巻, pp.571-576, 2008.
- 3) 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観測, 砂防学会誌, Vol.49, No.4, pp.34-37, 1996.
- 4) 鈴木拓郎, 水野秀明, 小山内信智, 平澤良輔, 水山高久: 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, No.5, pp.18-26, 2010.
- 5) 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.

(2014. 4. 3受付)