

音圧を利用した掃流砂観測手法の開発

DEVELOPEMENT OF THE BED-LOAD SEDIMENT OBSERVATION USING THE SOUND PRESSURE

桑村 貴志¹・宮藤 秀之²・山崎 久勝³

Takashi KUWAMURA, Hideyuki MIYAHUJI and Hisakatsu YAMAZAKI

¹正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所環境水工部 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)

²正会員 国土交通省北海道開発局建設部河川計画課 (〒060-8511 札幌市北区北8-西2)

³正会員 株式会社CTIサイエンスシステム (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町1-3)

With problems caused by sediment manifesting themselves in recent years, the need for comprehensive sediment management has been rising increasingly. To solve these problems, the appropriate monitoring of sediment transport is imperative. Observation of bed load shifting near river beds, however, is difficult because it is prone to the influence of river flows and river-bed contours.

For this reason, experiments on sound pressure generated by bed load were conducted using an experimental channel in this study. As a result, the underwater sound pressure was confirmed to be in proportion to the amount of drifting sand. It was possible to derive an experimental formula for bed load with single particle size of 3 mm or larger.

Key Words : *the bed-load sediment observation, flood observation, sediment transport*

1. 目的

近年、荒廃山地からの土砂流出による河床上昇やダム等における土砂供給の遮断及び洪水の減少による水みちの固定化や河床低下など土砂に起因する問題が顕在化しており、総合的な土砂管理の必要性が益々高まっている。

これら土砂管理上の問題を把握し解決していくためには、流砂系の土砂移動のモニタリングを実施していくことが必要である。しかし、出水時の調査は豪雨や強風などの悪天候時の作業が多く、安全性の確保や激しい水流の中での観測精度の向上など改善すべき問題は多い。特に河床近くを転がりながら移動する掃流砂の観測は、流水の圧力や河床の形状の影響を大きく受けるため直接採取して計測することは困難な状況である。音響や超音波などの観測値から間接的に流砂量を推定する観測法については澤井・銭谷¹⁾らにより有効な観測になりうることが指摘されているが、未だ実河川で実際に観測する技術は

開発されていない現状にある。しかし、近年の音響計測機器の進歩により、流砂が流下時に発生する音響の高精度な観測が可能となっており、実河川における音圧を利用した掃流砂観測が期待できる状況にある。

そこで本研究では、実際に河川での使用が可能である音圧センサーを実験水路に取り付けて流量や給砂量を変化させながら音圧の変化を測定し、流砂と発生音圧の関係について解析を行い、音圧から掃流砂の通過量を推定する手法の開発を試みた。

2. 掃流砂音圧実験の概要

(1) 実験の概要

実験用水路を使用して掃流砂音響実験を実施した。実験は表-1の諸元を持つ水路において、水理量(掃流力)と流砂(粒径、流砂量)を変化させながらピーク音圧、音圧の分散値を測定し、流砂との関係式を求めることを目的として行った。

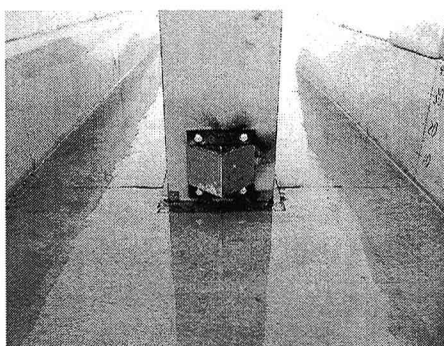


写真-1 三角柱取付方式 (手前が水路上流側)

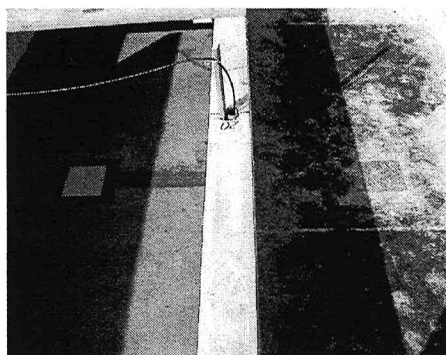


写真-2 底面埋設方式

ステンレス板と流砂が衝突することで発生する音圧を測定するため、今回の実験では写真-1に示すように音圧センサーを三角形のステンレス板に取り付けたものをH鋼に固定して、能動的に衝突音の集音を行う方法と、写真-2のように音圧センサーを取り付けた20cm角のステンレス板を水路底面に埋設し、やや能動的に集音する方法の二つの方式により音圧測定を行った。

音圧センサーは流砂の衝突によるステンレス板の振動を音として計測している。振動を発する板はその材質や形状・厚さに応じて、流砂の衝突力の大きさに関わらず固有の周波数をもっている。しかし、ステンレス板への流砂の衝突地点が異なると板の振動特性が変化することや底面埋設した筐体内部の共振、微小時間での流砂の連続衝突による波形の重なり等が発生することから実際に測定される周波数には若干の変動が生じると考えられる。

今回の実験では、流砂のステンレス板への衝突音と流水や周辺の自然音（流水バックグラウンド値）について計測を行うため複数のバンド帯域で音圧の計測を行った。

今回用いたステンレス板の衝突音は予備試験結果から1,000Hz帯域が主な周波数帯域と考えられ、自然音については河川などの自然空間において受動的に音を聞く場合に地中伝播音、構造物音等のいずれの音も空気中の音に比べ低周波域の音が多いことから²⁾、今回の実験においても1Hz帯域（超低周波音）、10Hz（低周波音）、100Hz（可聴低周波音）、1,000Hz（可聴低周波音）を基準周波数とした4つの低周波バンド帯域の音圧測定を行った。また、水路内における発生音を総合したものとして超低周波音（～20Hz）から可聴音（20～20,000Hz）の範囲を対象と

表-1 実験水路の諸元

水路長(m)	水路幅(m)	水路勾配	側壁、水路床
30	1.28	1/150	モルタル製

表-2 実験に使用した流下材料

名 称	中央粒径 D ₅₀ (mm)	最大粒径 D _{max} (mm)	篩い分け 係数
碎石40mm	43.8	75.0	1.174
4号碎石	26.3	53.0	1.209
5号碎石	15.4	26.5	1.221
6号碎石	8.1	19.0	1.345
7号碎石	3.5	9.5	1.247
洗砂	0.9	4.8	1.936
混合1	1.7	19.0	2.958
混合2	4.2	19.0	3.087
混合3	6.4	19.0	2.082

表-3 実験ケース

河床勾配Ib (水面勾配Iw)	流速V (流量Q)	濃度 (mg/l)	流砂量 (g/ms)	流下 材料
1/150 (1/154)	2.4m/s (900L/s)	100	70	単一
		500	351	(6種)
		1000	702	混合
		5000	3512	(3種)
1/150 (1/154)	1.5m/s (200L/s)	100	15.6	単一
		500	78	(6種)
		1000	156	混合
		5000	780	(3種)

した全帯域(0.5～20,000Hz)の音圧についても計測を行った。音圧の計測は、1秒毎の瞬間値を測定したが瞬間値毎の振れ幅が大きいため一定時間に観測された複数の瞬間値データの平均値を解析値として使用した。実験に先立ち実施した予備実験において、データ数の増加に伴う分散の変化が32データ以上になると少なくなったことから、今回の実験では32秒間のデータの平均値とした。また、これら32データの分散値もあわせて計測した。

実験水路を流下させる材料には表-2に示す6種類の単一粒径材料と、洗砂と6号碎石を比率を変えて混合した3種類の混合材料を用いた。今回の実験では調達しやすい碎石の規格品を流下材料として使用した。

実験は表-3に示すように流速、濃度、流下材料を変えながら音圧の観測を行った。給砂については1ケース当り必要な流下材料を事前に計量し、実験時に水路上流端から給砂器で投入量を管理しながら給砂を行った。

(2) 流砂の運動形態

水路内の流砂の運動形態は目視では十分に確認できないため、水理式からの推定が有効である。河床材料が浮遊

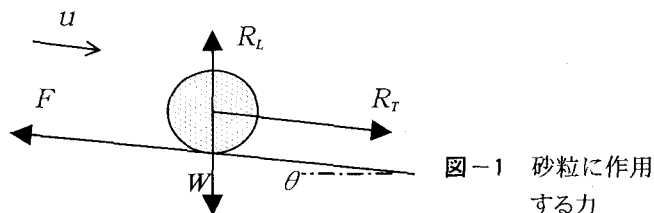


図-1 砂粒に作用する力

(R_T : 流れの方向の流体抵抗と圧力勾配による抵抗の和、 R_L : 鉛直方向の圧力勾配による揚力、 W : 砂粒に働く重力、 F : 摩擦力、 u : 流速、 θ : 河床勾配)

表-4 流下材料の u_s/ω_0

	洗砂	7号 碎石	6号 碎石	5号 碎石	4号 碎石	碎石 40mm
流速	(0.9)	(3.5)	(8.1)	(15.4)	(26.3)	(43.8)
$V=2.4$	1.48	0.71	0.46	0.33	0.26	0.20
$V=1.5$	0.87	0.41	0.27	0.20	0.15	0.12

表-5 流下材料の R_T/F

	洗砂	7号 碎石	6号 碎石	5号 碎石	4号 碎石	碎石 40
流速	(0.9)	(3.5)	(8.1)	(15.4)	(26.3)	(43.8)
$V=2.4$	-1848	-4920	2534	814	430	236
$V=1.5$	-4303	1518	418	194	118	75

し得る条件は $u_s/\omega_0 = 1$ 程度、水面近く舞い上がれるのは $u_s/\omega_0 = 2 \sim 3$ 程度であることが知られている³⁾。ここで u^* : 摩擦速度、 ω_0 : 沈降速度

今回用いた6種類の流下材料の運動形態を確認するために u_s/ω_0 について整理したものが表-4である。

流下材料の掃流については、岩垣⁴⁾が示したように一つの砂粒に作用する流体抵抗と圧力勾配による抵抗および重力とを用いて平衡条件を作り、これらの抵抗を速度変動を考慮して検討を行った。鉛直方向の層流底層の存在については、 $Reynolds$ 数 $u_* d/\nu > 5.11$ の場合には層流底層は完全に消滅するものとされている。今回の実験ケースの $Reynolds$ 数は $71.80 \sim 5950.12$ であり、層流底層は消滅したものと扱った。このとき砂粒には図-1のように力が作用し、(R_T/F) >1 のときに砂粒は移動することになる。また、 $R_L > W$ の場合には F が負の向きとなるために(R_T/F) <-1 となる。この場合、砂粒は浮遊状態となり流体抵抗を受けて移動することを表す。

R_T/F の計算結果を表-5に示す。洗砂の $V=1.4\text{m/s}$ 、 2.4m/s と7号碎石の $V=2.4\text{m/s}$ のケースでは負の値となっていることから浮遊を生じながら流下すると考えられる。また、他の流下材料についても全て(R_T/F) >1 の値となったことから実験時には全て掃流されるものと推定される。このことは u_s/ω_0 の検討結果とも合致している。

3. 実験結果

(1) 解析に使用する音圧データの選定

単位幅流砂量 Q_B ($\text{g/m}\cdot\text{sec}$)と計測音圧値 P (μPa)と

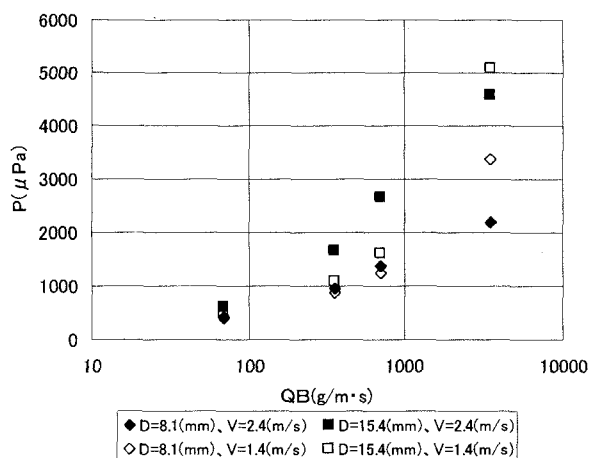


図-2 $Q_B - P$ 図 (底面埋設方式)

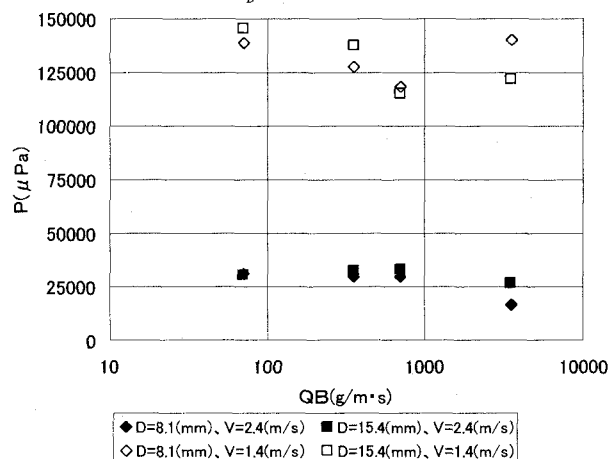


図-3 $Q_B - P$ 図 (三角柱取付方式)

関係について図-2、3に示す。図-2は底面埋設方式の音圧センサーにより測定した Q_B と P (全体域)の関係図であり、図-3は三角柱取付方式の音圧センサーにより測定した Q_B と P の関係図である。ここでは9種類の流下材料のうち8.1mmと15.4mmのものについて示した。

底面埋設方式では、音圧は流砂量の増加にともなって大きくなっている。しかし、三角柱取付方式では音圧と流砂量との比例関係は認められない。これは三角柱取付方式の場合、流水が三角柱に直接あたるものの、流砂は三角柱の両脇をすりぬけるため流砂量が増大しても流砂の音圧がほとんど発生せず大きな流水音のみが計測されていることが実験時の観察から考えられる。このため、流砂量換算式の検討にあたっては底面埋設方式の音圧センサーによる測定値(単一粒径)のみを使用した。

周波数帯域別の音圧データを比較したものが図-4である。流水バックグラウンド値は砂礫を投入せずに流水のみ流した状態で流水音や他の自然音を計測したものである。帯域別で見ると、流砂の発生音圧は全ての粒径と流砂量において1000Hzの計測値が最も大きい。また、1000Hz帯域の音圧は全帯域の音圧に対しても十分に大きく、流砂の発生音(厳密にはステンレス衝突板の振動音)の固

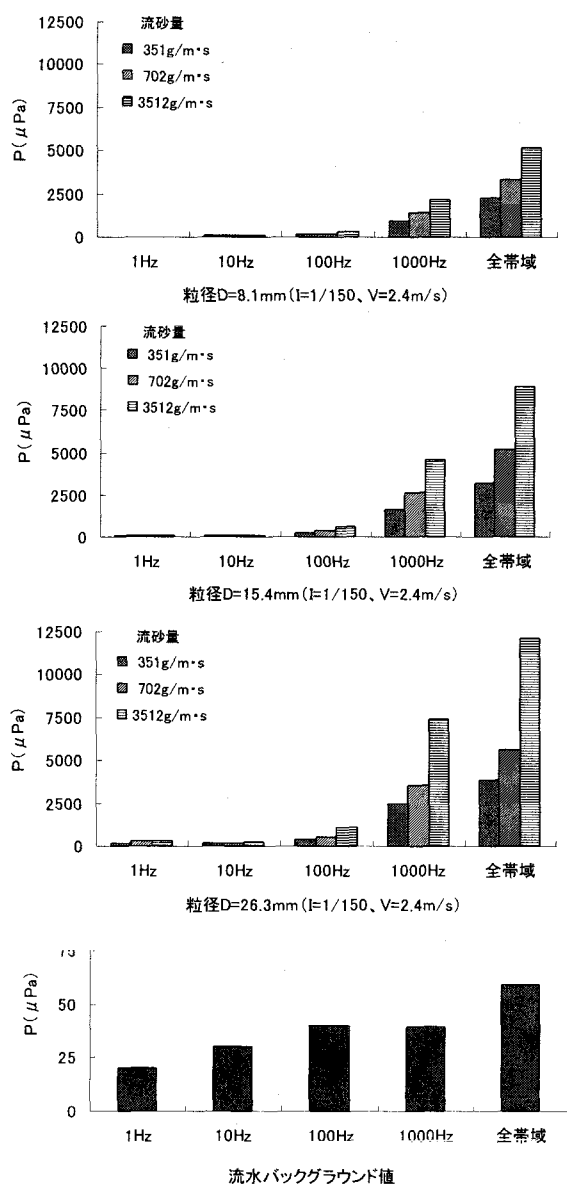


図-4 周波数帯域別の音圧データ(上から粒径D=8.1、15.4、26.3mmの音圧、流水バックグラウンド値)

有周波数は1000Hz付近に発生していると考えられる。流水バックグラウンド値は100Hz付近を小さなピークとして低周波数帯全域に分布しているが、流砂の発生音圧に比べると音圧レベルはかなり小さい。解析にあたっては、流砂の発生音の固有周波数に近いと思われる1000Hz帯域の計測音圧値 P_r を採用し、さらに1000Hz帯域の流水バックグラウンド値 P_w を減じた値を流砂による音圧増加値 ΔP とする。

4. 流砂量換算式の検討

(1) 実験式の検討

音圧増加量 ΔP と流砂量 $Q_b^{1/2}$ の関係を図-5に示す。全ての粒径において、流砂量の増加にともない音圧が増

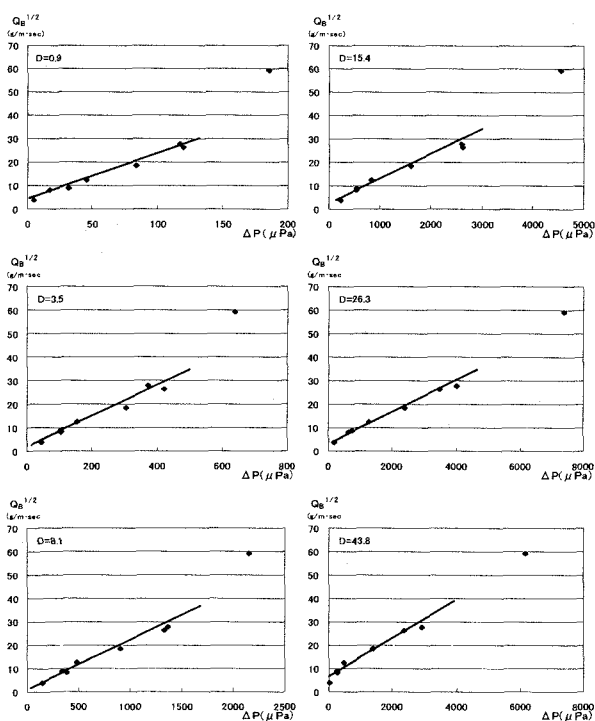


図-5 音圧増加量 ΔP と流砂量 $Q_b^{1/2}$ の関係図

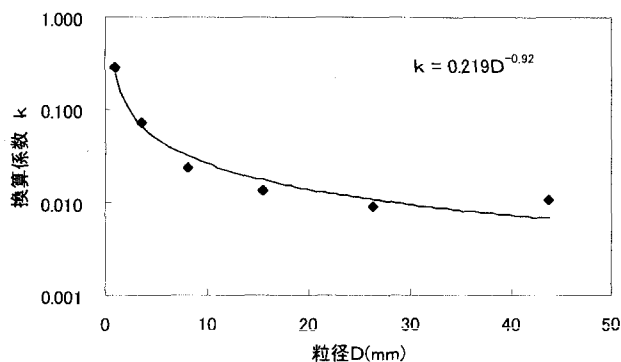


図-6 流砂量換算係数 k (平均値)

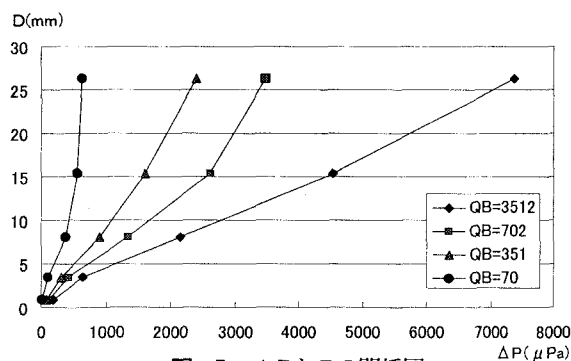


図-7 ΔP と D の関係図

加することから、換算係数を k [$(g/m^3)^{1/2}/\mu Pa$] としたときに $Q_b^{1/2} = k \cdot \Delta P$ の関係が考えられる。 Q_b と ΔP の実験値から逆算して求めた各粒径における k の値を図-6に示す。また、 ΔP と D の関係について流砂量毎に整理したものが図-7である。同じ流砂量るとき、粒径が大きくなると音圧は増加し、 ΔP と D は粒径0.9mmから26.3mmの範囲では一次的直線関係にあることがわかる。

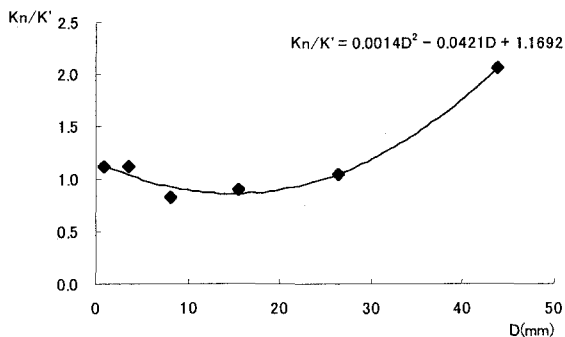


図-8 k_n/k' - D の関係図

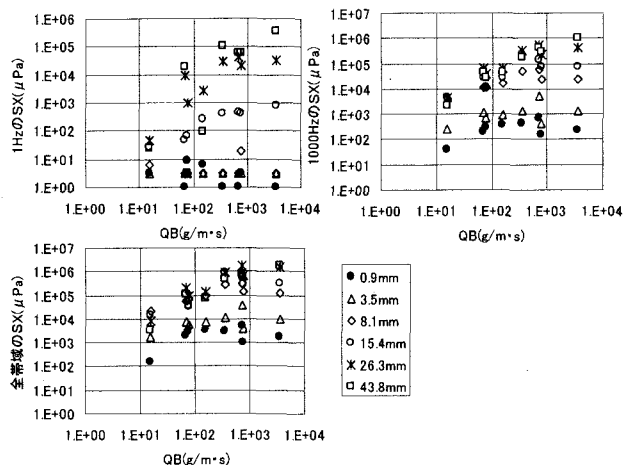


図-9 Q_B - SX の関係図 (1Hz, 1000Hz, 全帯域)

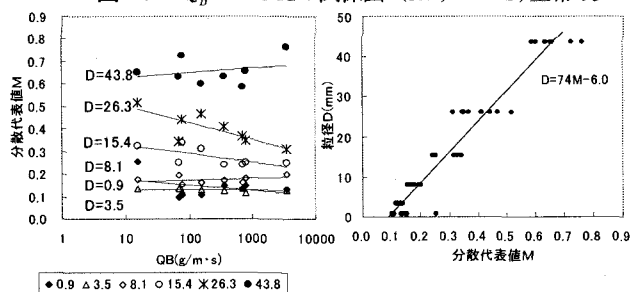


図-10 Q_B - M の関係図

図-11 M - D の関係図

このように Q_B と ΔP の関係は粒径の影響を大きく受け、換算係数 k のみで流砂量換算することは難しいため、流砂量推定の実験式には粒径 D を変数として与えることとした。よって、最終的に次の実験式を求めた。

$$\begin{aligned} Q_B^{1/2} \cdot D &= k \cdot \Delta P \\ \Delta P &= P_r - P_w \text{ とすると} \\ Q_B^{1/2} \cdot D &= K \cdot (P_r - P_w) \end{aligned} \quad (I)$$

このとき、実河川で用いるためには D を未知の値として扱う必要があり、本検討でも D には音圧分散値から求めた粒径推定値を用いる（推定方法は後述）。 Q_B 、 D 、 K 、 P_r 、 P_w から (I) 式を逆算することにより、あらたに換算係数 $K((g/ms)^{1/2} \cdot mm / \mu Pa)$ を求める。各粒径の換算係数を K_n 、全粒径の K_n 平均値を $K' = 0.232 [(g/ms)^{1/2} \cdot mm / \mu Pa]$ とし、図-8 に K_n/K' と D の関係を示す。粒径 0.9mm から 26.3mm の範囲では $K_n/K' = 0.9 \sim 1.1$ であり、 K 値の粒径による変化がほとんど見られなくなった。しか

し、粒径 43.8mm は $K_n/K' = 2.0$ と高い値を示したことから、 K 値は換算係数平均値 ($K' = 0.232$) ではなく、図-8 に示す近似式により D (推定値) から求められた K 値を流砂量計算に用いることとした。

(2) 代表粒径値推定式の検討

流砂量が一定であるとき、粒径が大きくなるにつれて砂礫の個数が少なくなり、音圧センサーへの衝突頻度の時間的なばらつきが大きくなると考えられる。また、粒径が大きくなると掃流形態が転動や滑動など異なる動きを示すために衝突時の発生音圧のばらつきが生じやすくなると考えられる。これらのことから観測時間内 (32秒) におけるピーク音圧の分散値 SX に着目し粒径推定式の検討を行った。

実験では 1Hz, 1000Hz, 全帯域において図-9 に示ような結果を得た。1000Hz 帯域では、0.9~15.4mm の各粒径において特徴的な分散値 SX が認められるが、それより大きな 26.3~43.8mm の粒径では粒径毎による差があまり見られなく区分は難しい。しかし、超低周波の 1Hz 帯域では 15.4mm 以上の大きな粒径で特徴的な分散値が生じている。そのため SX (1000Hz 帯域) に SX (1Hz 帯域) を組み合わせることで大きな粒径も含めた粒径毎の代表的な分散値 M が得られると考え、 M と粒径 D の回帰式による分散値から粒径への推定を試みた。分散代表値 M は線形を得るために SX (1Hz 帯域) と SX (1000Hz 帯域) をそれぞれ SX (全帯域) で除し合算したものとした。

$$M = \frac{SX_{(1\text{Hz 帯域})}}{SX_{(全帯域)}} + \frac{SX_{(1000\text{Hz 帯域})}}{SX_{(全帯域)}}$$

上記の式より求めた代表分散値 M と流砂量 Q_B の関係を図-10 に示す。全体的に、粒径が大きいほど各粒径の M が高く、 Q_B が変化しても各粒径の M がほぼ一定の値を示すことから M は単一粒径の推定に有効と考えられる。

分散代表値 M と実測平均粒径 D との関係を図-11 に示す。 D と M の回帰式は $D = 74M - 6.0$ となり、計測された SX (1Hz, 1000Hz, 全帯域) から M を求めたのち、回帰式から粒径推定値 D が求められる。

5. 結果と考察

図-12 に示す計算フローにより、計測された音圧値と分散値から流砂量と粒径の計算を行い、その計算値と実測値の比較検討を行った。

単一粒径実験の流砂量実測値との計算値を比較したものが図-13 である。 $D = 3.5 \sim 26.3\text{mm}$ の流砂量の計算値は実測値をよく再現しているが $D = 0.9\text{mm}$ の砂や 43.8mm の礫については実測値に比べて計算値はかなり小さい結果となっている。これは $D = 0.9\text{mm}$ の砂は浮遊しながら流下し衝突音があまり生じないため、他の粒径に比べて同じ流砂

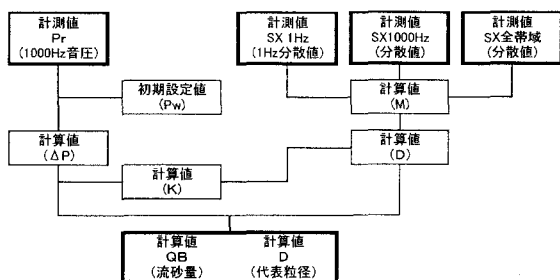


図-12 流砂量と粒径の計算フロー

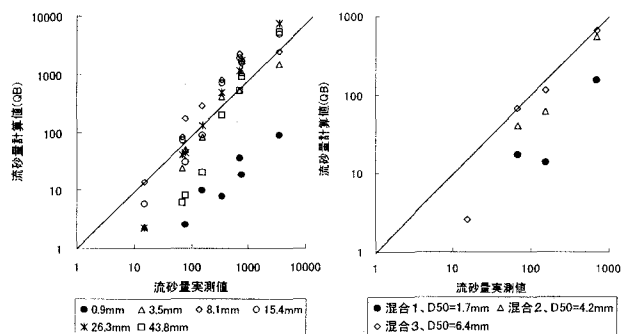


図-13 流砂量の実測値と計算値の比較 (単一粒径)

図-14 流砂量の実測値と計算値の比較 (混合粒径)

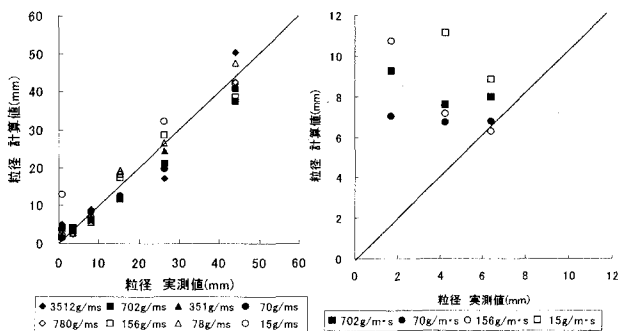


図-15 粒径の実測値と計算値の比較 (単一粒径)

図-16 粒径の実測値と計算値の比較 (混合粒径)

量であっても非常に音圧レベルが小さく、有効な音圧観測値 P_r が得られないためと考えられる。また、43.8mmの礫の計算値が小さい理由としては、他の粒径材料が転動しながら流下してステンレス板に衝突するのに対して、滑動するように流下することが目視で確認されていることから粒径のわりに発生する衝突音が小さい可能性があることや、同じ流砂量のときに礫粒の個数が他の粒径のものに比べると非常に少ないため、統計的な問題として32秒間の音圧平均値が必ずしも本来の発生音圧を表していないことなどが考えられる。

混合粒径の流砂量実測値と計算値を比較したものが図-14である。混合3については流砂量の計算値と実測値がよく合っているが、混合2と混合3では計算値が実測値よりも少なかった。混合材料は0.9mmの砂と8.1mmの礫を配合しており、有効な音圧が生じない砂の配合が増えるほど計測される有効音圧が少なくなることなどが考えられる。

単一粒径の粒径実測値と計算値を比較したものが図-15である。凡例は測定時の流砂量を示しており、 $Q_B = 3512, 702, 351, 70\text{g/ms}$ が流速 $V=2.4\text{m/s}$ 、 $Q_B = 780, 156, 78, 15\text{g/ms}$ が流速 $V=1.4\text{m/s}$ で実験を行ったものである。計算値と実測値は概ね合致しているが、 $V=2.4\text{m/s}$ の4ケースでは粒径の計算値が小さくなる傾向がある。このことは、粒径を推定するための音圧分散値が固有値ではなく、水理条件により変化する可能性を示すものと考えられる。

混合粒径における粒径の推定については、図-16に示すとおり良好な結果が得られなかった。計算値が実測値に比べて大きいのは、大小の粒径が混合されているために音圧分散値が高くなり、分散値から求められる粒径推定値が大きくなったため、もしくは混合した二種類の材料のうち、 $D=0.9\text{mm}$ の音圧が非常に小さいため $D=8.1\text{mm}$ の音圧が支配的になり、8.1mmの単一粒径と同様な分散値となったことなどが考えられるが、今回の実験では原因を確認できなかった。しかし、いずれも音から混合粒径を推定するにあたって不可避の問題であり、分散値から混合粒径平均値を推定することは困難であると考えられる。

6. 結果

本研究を通して得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 単一粒径、混合粒径の流砂量推定は、有効な観測音圧値が得られる粒径 ($D=3\sim30\text{mm}$) で良好な結果を得た。しかし、他の水路や水理条件における適用については検証が必要である。
- (2) 分散値からの粒径の推定は、単一粒径においては概ね良好な結果であったが、水理条件により分散値の特性が大きく変わる可能性がある。混合粒径については分散値からの粒径の推定は困難であると考えられる。
- (3) 砂 ($D=0.9\text{mm}$) 以下の粒径については有効な音圧を得ることは難しい。

謝辞： 本研究は北海道開発局河川計画課をはじめとした寒地河川学研究会で取り組んでいる土砂管理計画検討の一部門として研究を行ったものである。研究会の関係者並びに東京電機大学山口教授、北海道大学外山助手から多くの貴重な御意見や御指摘をいただいた。この場を借りて謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1) 澤井健二、銭谷善信：衝突音による粒径別流砂量測定法に関する研究、水工学論文集vol.4, 1997
- 2) 中野有朋：超低周波工学、技術書院 1981
- 3) 土木学会：水理公式集、1999
- 4) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究、土木学会論文集、
- 5) 旭川開発建設部：土砂管理計画検討業務報告書、2001

(2001. 10. 1 受付)