

フローセル型超音波減衰スペクトル計による 洪水時の粒径区分別土砂輸送量の連続観測

CONTINUOUS MEASUREMENT OF NON-UNIFORM SUSPENDED SEDIMENT
TRANSPORT UNDER FLOODING CONDITIONS USING A FLOW-CELL TYPE
ULTRASONIC ATTENUATION SPECTROMETER

古川仁志¹・福重裕史²・河下重和³・朝岡良浩⁴・長林久夫⁵

Hitoshi FURUKAWA, Yuuji FUKUSHIGE, Shigekazu KAWASHITA, Yoshihiro ASAOKA
and Hisao NAGABAYASHI

¹ 正会員 博(工) 日本大学工学部 客員研究員 (〒 963-8642 福島県郡山市田村町徳定)

² 非会員 電源開発株式会社西日本支店土木 G 課長 (〒 530-0005 大阪府大阪市北区中之島 6 丁目 2-27)

³ 非会員 株式会社 JP ビジネスサービス社会環境部 部長代理 (〒 135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

⁴ 正会員 博(工) 日本大学准教授工学部土木工学科 (〒 963-8642 福島県郡山市田村町徳定)

⁵ 正会員 博(工) 日本大学名誉教授工学部土木工学科 (同上)

In this study, suspended sediment transport in rivers was observed at Setoishi Dam on the Kumagawa River in Japan using a measurement system consisting of a submersible pump and a flow-cell type ultrasonic attenuation spectrometer. The main results obtained in this study are as follows. The total ultrasonic attenuation coefficient α is due to the fine particles, the fine bubbles in water, the velocity of flow passing into the flow cell, and the intrinsic losses. The attenuation coefficient due to the fine particles contains scattering and viscous losses, and the equivalent sphere size parameters are $a_0=0.68$, $b_0=1.54$, and $c_0=0.8$, obtained from Furukawa *et al.* Non-uniform suspended sediment transport was calculated using a vertical distribution of sediment concentration by the Rouse equation and a logarithmic velocity distribution equation. It was found that 10% of the total suspended sediment transport is sand, 34% is coarse silt, and 56% is wash load with a particle size of 0.016 mm or less.

Key Words: *Ultrasonic attenuation spectrometer, non-uniform suspended sediment transport, phi scale, the Rouse equation, the Kumagawa River*

1. まえがき

近年、ダムの堆砂対策として浚渫・掘削だけでなく洪水時のダム水位操作による通砂・排砂運用が数多く報告¹⁾されており、この傾向は今後も増加するものと予想される。通砂・排砂運用は堤高の低いダムや本格的な排砂設備を有するダムに限定されるが、貯水池末端部の河床上昇やダム堆砂量を軽減するなどの効果があるだけでなく、ウォッシュロードから砂までの各種粒径の土砂をダム下流に輸送することによって下流河川や海域の生態系を含む河川環境改善効果が期待できる。この通砂・排砂運用による影響を定量的に評価するためには、ダムをはじめ上下流の各観測地点において土砂の量と質の連続観測を行い、各観測地点のウォッシュロード、シルト、砂等の粒径区分別浮遊砂輸送量を観測して、その移動形態を明らかにする必要がある。

大槻ら²⁾は、本研究の対象となった球磨川において、荒瀬ダム撤去の影響を評価するため、2010年から2012

年にかけて土砂移動の観測を行い、出水時の浮遊土砂の50%粒径 D_{50} は概ね $10\mu\text{m}$ 以下で、99%以下がシルトであると結論づけている。また、川崎ら³⁾の研究では不知火海(八代海)の干潟・沿岸堆積物の粒度は2002年までは粘土質であったが、現況では砂質化していることを報告している。しかし、これらの研究では球磨川の砂移動を十分解明できていない。本研究では、古川ら^{4,5)}が開発を進めているフローセル型超音波減衰スペクトル計による浮遊砂濃度と粒度分布の計測性能を検証するとともに、粒径区分別浮遊砂輸送量を算出し、瀬戸石ダムの通砂・排砂運用の実施が八代海の干潟の砂質化に与える影響を考察する。

2. 超音波減衰スペクトル法による浮遊砂観測

(1) 測定方法

超音波減衰スペクトル法⁶⁾(Ultrasonic Attenuation Spectroscopy, 以下「UAS」という。)は周波数の関数と

して測定した減衰係数（減衰スペクトル）から ECAH 理論^{7,8)}に基づき濃度と粒度分布を逆解析で求める方法である。測定値は次式に示す残差平方和 SSD (sum of squares of differences) が最小となる理論値に含まれる固体体積分率と粒度分布モデルを反復計算で決定する。

$$SSD = \sum_i [\alpha_{\text{meas}}(f_i) - \alpha_{\text{th}}(f_i)]^2 \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_{\text{meas}}(f_i)$ は周波数 f_i での減衰係数の測定値、 $\alpha_{\text{th}}(f_i)$ は理論値を示す。

(2) 浮遊砂観測に用いる線形モデル

実河川における浮遊砂観測では、浮遊砂粒子による減衰だけでなく、流水中のファインバブル (FB) による減衰、フローセルやポンプ等の観測装置に由来する減衰が発生する。既往の研究⁵⁾では浮遊砂粒子による減衰と FB による減衰を単一のモデルとして取り扱ってきたが、等価粒径係数が実験値と大きく異なる結果になった。このため、本研究では浮遊砂粒子による減衰係数に実験から求められた等価粒径係数を適用するとともに、FB による影響を減衰係数として評価できる線形モデルを用いる。この線形モデルを次式に示す。

$$\alpha_{\text{th}}(f_i) = \alpha_p(f_i) + \alpha_{\text{fb}}(f_i) + \alpha_{\text{fc}}(f_i) + \alpha_{\text{sta}}(f_i) \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_p(f_i)$ は浮遊砂粒子による減衰係数、 $\alpha_{\text{fb}}(f_i)$ は FB による減衰係数、 $\alpha_{\text{fc}}(f_i)$ はフローセルの減衰係数であり、水温とフローセルを通過する流速に依存する。この減衰係数は実験式から算出する。また、 $\alpha_{\text{sta}}(f_i)$ は濃度ゼロ時の減衰係数をゼロとする現地補正係数である。

(3) 浮遊砂粒子による減衰係数

粒径が 2 mm 以下の浮遊砂粒子による減衰係数は次式⁹⁾で与えられる。

$$\alpha_p(f_i) = \phi_p \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) g(d_j) \Delta x \quad (3)$$

$$K(f_i, d_j) = \frac{1}{\phi_p} [\alpha_{\text{sc}}(f_i, d_j) + \alpha_{\text{vis}}(f_i, d_j)] \quad (4)$$

ここで、 $\phi_p (= C/\rho_2)$ は粒子の固体体積分率、 C は濃度、 ρ_2 は浮遊砂粒子の密度、 $K(f_i, d_j)$ は周波数 f_i 、粒径 d_j の粒子による減衰係数でカーネル行列¹⁰⁾と呼ばれている。 $g(d_j) \Delta x$ は粒度分布モデルに含まれる粒径 d_j の体積比率を示す。浮遊砂粒子による減衰係数の理論値は粒径階級 j が 1 から m までの各粒径の粒子による減衰係数の総和となる。 $\alpha_{\text{sc}}(f_i, d_j)$ は散乱損失による減衰係数、 $\alpha_{\text{vis}}(f_i, d_j)$ は粘性損失による減衰係数を示す。

(4) 散乱損失と粘性損失

散乱損失による減衰係数は次式に示す等価球形散乱体モデル¹¹⁾で算出する。

$$\alpha_{\text{sc}}(f_i, d_j) = -\frac{3b_0\phi_p}{2k^2(a_0r)^3} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(A_n) \quad (5)$$



図-1 球磨川流域図

ここで、

$$A_n = -\frac{i \cdot \tan \eta_n}{1 + i \cdot \tan \eta_n},$$

$k (= \omega/c)$ は波数、 ω は角周波数、 c は水中の音速、 r は粒子の半径、 A_n は Faran¹²⁾ の n 次の散乱係数、 $\text{Re}(A_n)$ は A_n の実部、 $i = \sqrt{-1}$ 、 a_0 と b_0 は Schaafsma and Hay の等価粒径係数¹³⁾である。古川ら¹¹⁾は佐久間貯水池上流部（長野県天龍村）で採取した土砂を 0.3 mm から 0.02 mm の 18 種類のフルイで分級したシルト・細砂を用いた実験から等価粒径係数 $a_0 = 0.68$ 、 $b_0 = 1.54$ を示している。

また、粘性損失による減衰係数 $\alpha_{\text{vis}}(f_i, d_j)$ は次式に示す McClements⁶⁾の式で算出する。このモデルは粒径 0.01 ~ 30 μm の粒子の測定に適用できる。

$$\alpha_{\text{vis}}(f_i, d_j) = \frac{1}{2} \frac{\phi_p k s (\rho_2 - \rho_1)^2}{(\rho_2 + T\rho_1)^2 + s^2 \rho_1^2} \quad (6)$$

ここで、

$$s = \frac{9\delta_v}{4c_0r} \left(1 + \frac{\delta_v}{c_0r}\right), T = \frac{1}{2} + \frac{9\delta_v}{4c_0r}, \delta_v = \sqrt{\frac{2\eta_1}{\omega\rho_1}},$$

ρ_1 は水の密度、 η_1 は水の粘度、 c_0 は古川ら¹⁴⁾の等価粒径係数で、粒径 0.1 μm から 0.1 mm までの粒径の異なる三種類のシリカ粒子の実験から $c_0 = 0.8$ が得られている。

3. 浮遊砂観測の概要

(1) 観測の概要

平成 30 年台風 24 号出水時に球磨川・瀬戸石ダムでフローセル型超音波減衰スペクトル計⁴⁾による浮遊砂観測を行った。図-1 に瀬戸石ダムの位置図を示す。瀬戸石ダムは流域面積 1629.3 km^2 、高さ 26.5 m の発電専用ダムである。瀬戸石ダムの hidrograph を図-2 に示す。人吉地点の累計雨量は約 100 mm、最大流量は約

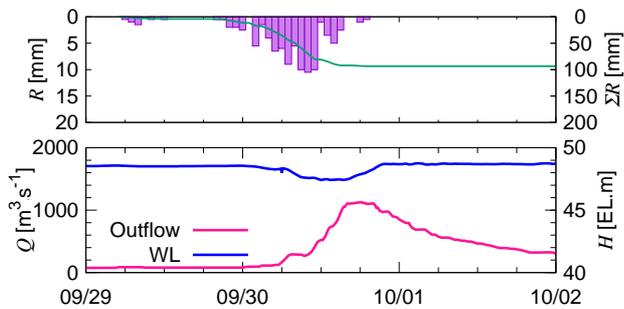


図-2 平成 30 年台風 24 号出水時の人吉地点（気象庁）の時間雨量および瀬戸石ダムのハイドログラフ

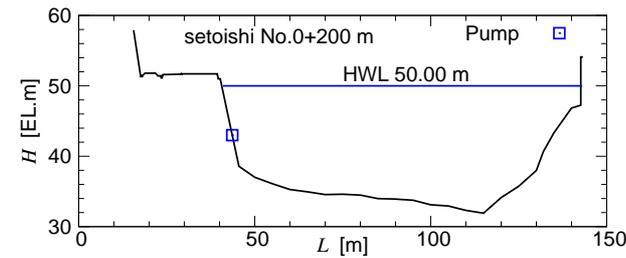


図-3 観測地点の横断面図

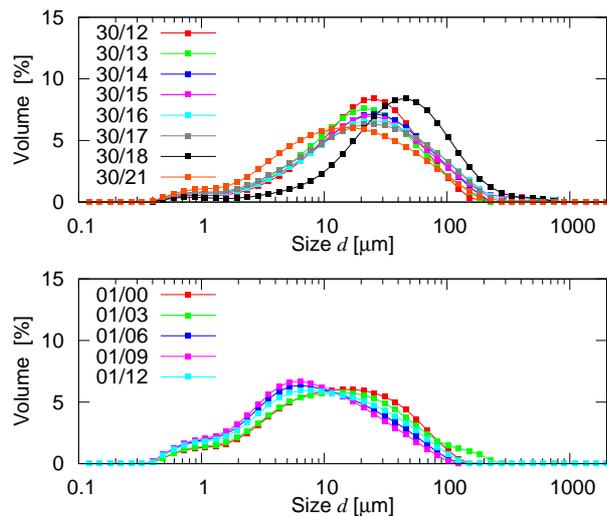


図-4 平成 30 年台風 24 号出水時の浮遊砂の粒度分布の測定結果

$1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ である。また、観測地点の調整池横断面を図-3に示す。幅約 100 m、平均水深は約 13 m、左岸の EL.43 m に水中ポンプ (0.75 kW) を設置して、毎分約 $250 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ の河川水を連続取水してフローセル型超音波減衰スペクトル計で浮遊砂濃度と粒度分布を 10 分間隔で測定した。また、ポンプで取水した濁水を増水時は 1 時間毎、減水時は 3 時間毎に 2 l 採水して浮遊砂の濃度と粒度分布を測定した。濃度はガラス繊維濾紙 (GFP) 法、粒度分布はレーザ回折・散乱法 (Malvern 社製 MASTERSIZER-2000) で測定した。粒度分布の測定結果を図-4に示す。また、9 月 30 日 15 時から 18 時に濁水各 20 l の取水して JIS A-1202 に基づき浮遊砂粒子の密度を測定し、 $\rho_2 = 2560 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ が得られた。

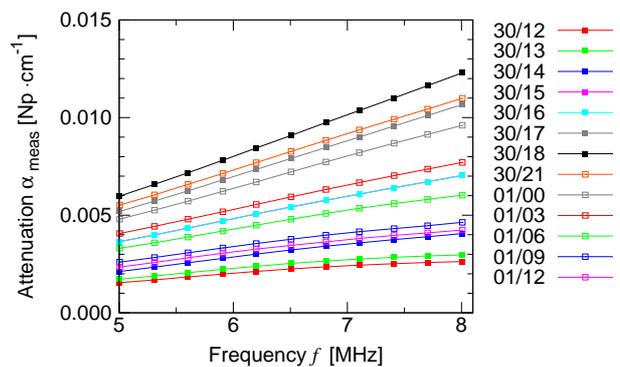


図-5 減衰スペクトルの測定結果 (採水時)

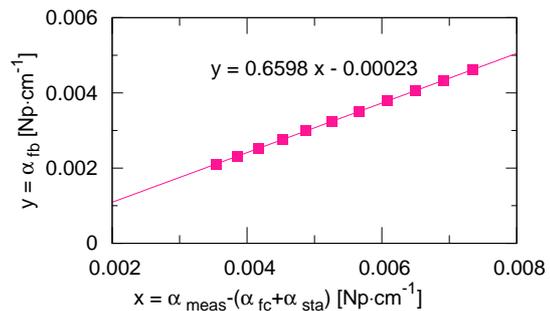


図-6 FB の減衰係数の解析例 (30/21)

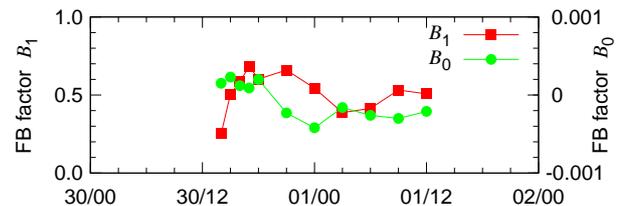


図-7 FB 係数の解析結果

(2) FB の減衰係数

採水時の減衰スペクトルの測定結果を図-5に示す。FB の減衰係数 $\alpha_{fb}(f_i)$ は $\alpha_{meas}(f_i) = \alpha_{th}(f_i)$ とすると、次式で算出できる。

$$\alpha_{fb}(f_i) = \alpha_{meas}(f_i) - \alpha_p(f_i) - \alpha_{fc}(f_i) - \alpha_{sta}(f_i) \quad (7)$$

ここで、 $\alpha_p(f_i)$ は採水した濁水に含まれる浮遊砂の濃度 C と粒度分布 $g(d_j)\Delta x$ および浮遊砂粒子の密度 ρ_2 から式 (3) を用いて算出した。図-6に 9 月 30 日 21 時の FB の減衰係数の解析結果の一例を示す。FB の減衰係数は次式で与えられることが分かった。

$$\alpha_{fb}(f_i) = B_1 \left\{ \alpha_{meas}(f_i) - (\alpha_{fc}(f_i) + \alpha_{sta}(f_i)) \right\} + B_0 \quad (8)$$

ここで、 B_0 と B_1 を FB 係数という。図-7に FB 係数の解析結果を示す。

(3) 浮遊砂濃度・粒度分布の測定結果

濃度と粒度分布は式 (1) を適用して反復計算で固体体積分率と粒度分布を求めた。等価粒径係数は、 $a_0 = 0.68$ 、 $b_0 = 1.54$ 、 $c_0 = 0.8$ を用いた。浮遊砂濃度は次式で算

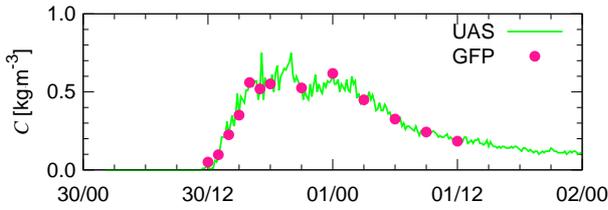


図-8 浮遊砂濃度の測定結果

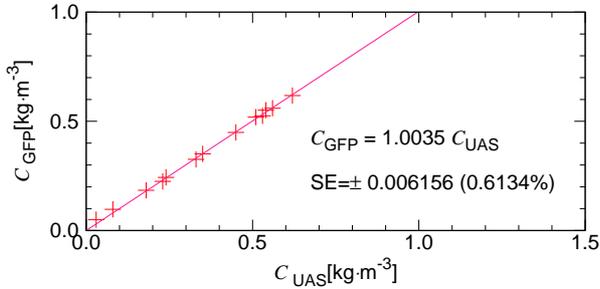


図-9 GFP法とUAS法による濃度の測定値の比較

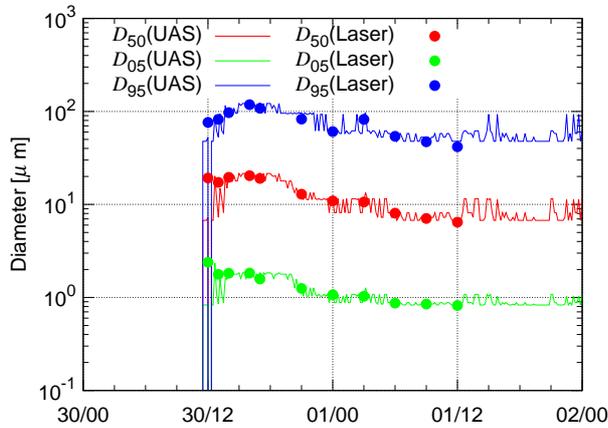


図-10 浮遊砂の粒度 (D_{50}, D_{05}, D_{95}) の測定結果

出した。

$$C = \phi_p \cdot \rho_2 \quad (9)$$

粒度分布モデルは図-4に示す測定データを適用した。超音波減衰スペクトル法による浮遊砂濃度の測定結果を図-8と図-9に示す。両者は良く一致しており、これはFB係数をGFPの測定値から算出しているため当然の結果であるが、同時にFB係数が濃度の測定に大きく影響することを示している。次に、図-10に粒度の測定結果を示す。「Laser」はレーザ・回折散乱法による測定値を示す。9月30日12~18時までの浮遊砂の50%粒径 D_{50} は約20 μm であることが分かった。また、UAS法とLaser法の測定値はよく一致することが分かった。

4. 粒径区分別浮遊砂輸送量の観測

(1) 粒径区分別浮遊砂濃度

超音波減衰スペクトル法では濃度と粒度分布の同時計測ができるので、粒径階級 j の粒径区分別濃度 C_j は

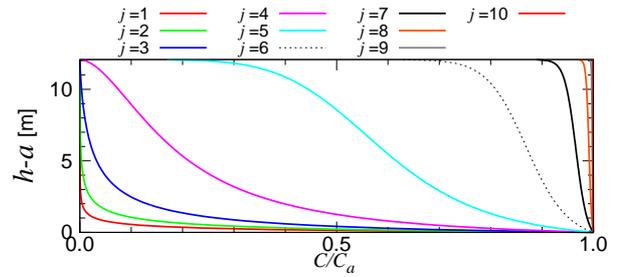


図-11 Rouse分布 (2018/09/30/16:00)

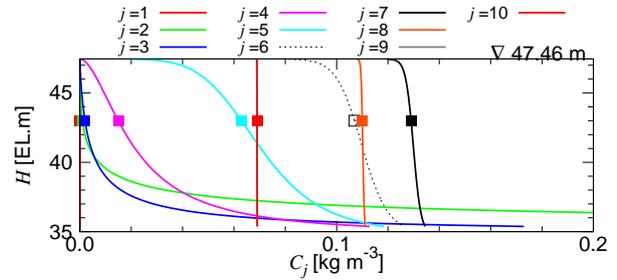


図-12 粒径区分別濃度の鉛直分布 (2018/09/30/16:00)

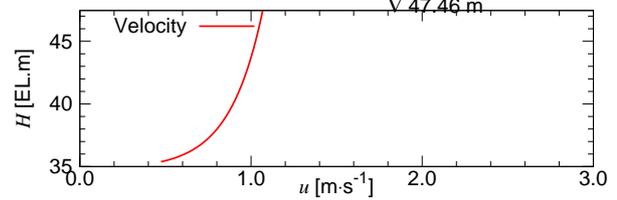


図-13 流速分布 (2018/09/30/16:00)

次式で与えられる。

$$C_j = C \cdot g(d_j) \Delta x \quad (10)$$

粒径区分別浮遊砂濃度の測定値の一例を表-1に示す。粒径階級は ϕ スケールに準拠して $j=1 \sim 10$ の10階級とした。平均粒径は幾何平均値を示す。

(2) 水理量の計算

観測地点はダムから200m上流の断面変化の少ない直線河道区間にある瀬戸石調整池左岸を選定した。観測地点の横断面は図-3に示すように水面幅約100m、水深約15mの河道断面であり、出水時の流れの状態は等流・乱流状態になる。水理量の計算例(9月30日16時)を表-2に示す。水位 H は瀬戸石ダム水位、流量 Q は瀬戸石ダム放流量(時間平均値)を示す。平均流速 \bar{U} は Q/A 、平均水深 h は A/L で算出した。エネルギー勾配 I は粗度係数 $n=0.04$ を用いてマンニングの平均流速公式から求めた。

$$\bar{U} = \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot I^{1/2}, \quad I = \left(\frac{\bar{U} \cdot n}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (11)$$

また、摩擦速度 u_* は次式より算出した。

$$u_* = \sqrt{ghI} \quad (12)$$

表-1 粒径区分別浮遊砂濃度の測定結果と Rouse 定数 (2018/09/30/16:00)

粒径階級 j	粒径範囲 [mm]	平均粒径 d_j [mm]	濃度 C_j [kg·m ⁻³]	沈降速度 ω_f [m·s ⁻¹]	$\omega_f u_*^{-1}$	Rouse 定数 Z
1	$2.000 \geq d > 1.000$	1.414	0	0.1233	1.5829	3.2977
2	$1.000 \geq d > 0.500$	0.707	0.001	0.0780	1.0005	2.0845
3	$0.500 \geq d > 0.250$	0.354	0.002	0.04625	0.5934	1.2364
4	$0.250 \geq d > 0.125$	0.177	0.015	0.02686	0.268648	0.5596
5	$0.125 \geq d > 0.063$	0.0884	0.063	0.006543	0.083962	0.1749
6	$0.063 \geq d > 0.032$	0.0442	0.107	0.001704	0.021872	0.04556
7	$0.032 \geq d > 0.016$	0.0221	0.129	0.000428	0.005498	0.01145
8	$0.016 \geq d > 0.008$	0.0110	0.110	0.000107	0.001376	0.002866
9	$0.008 \geq d > 0.004$	0.00552	0.069	2.68E-05	0.000344	0.000716
10	$0.004 \geq d$	0.00226	0.069	6.70E-06	8.60E-05	0.000179
計			0.565			

表-2 水理量の計算結果 (2018/09/30/16:00)

水位 H [EL.m]	流量 Q [m ³]	流積 A [m ²]	水面幅 L [m]	潤辺長 S [m]	径深 R [m]	平均流速 \bar{U} [m·s ⁻¹]	平均水深 h [m]	エネルギー勾配 I	摩擦速度 u_* [m·s ⁻¹]
47.46	1056	1208.9	95.31	108.16	11.18	0.873	12.68	0.00005	0.08

(3) 濃度の鉛直分布 (Rouse 分布)

浮遊砂の濃度分布およびその量は粒径によって著しく異なるので、浮遊砂量の計算は粒径区分別に行わなければならない。等流・乱流状態にある流れの場合、浮遊砂の濃度分布は基準点 $y = a$ における濃度を $C = C_a$ とすると、次式で与えられる。

$$\frac{C(y)}{C_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^Z, \quad Z = \frac{\omega_f}{\beta \kappa u_*} \quad (13)$$

ここで、 $C(y)$ は浮遊砂濃度、 y は河床からの距離、 h は水深、 a は河床から浮遊砂濃度の基準点までの高さである。 ω_f は粒子の沈降速度、 κ は Kármán 定数 ($\kappa \approx 0.4$)、 β は砂の拡散係数と渦動粘性係数との比で $\beta = 1.2$ 程度にとられる。基準点高さは水深の 5% ($a = 0.05h$) とした。表-2 に示す摩擦速度 u_* を用いて算出した Rouse 定数 Z を表-1 に示す。沈降速度 ω_f は Rubey の式を用いて算出した。また、表-1 に示す Rouse 定数を適用して式 (13) を用いて算出した Rouse 分布を図-11 に示す。水深と基準点高さは、 $h = 12.68$ m、 $a = 0.60$ m とした。Rouse 分布から浮遊砂濃度 $C(y)$ を求めるためには基準点濃度 C_a もしくは任意の水深の濃度の測定値が必要となる。ここでは表-1 に示す粒径区分別濃度から鉛直分布を求めた。この測定値は水位 EL.43.0 m の濃度であり、この測定値に図-11 に示す Rouse 分布を適用して求めた浮遊砂の粒径区分別濃度の鉛直分布を図-12 に示す。各 ■ は表-1 に示す浮遊砂濃度の測定値を示す。9月30日16時の測定値には粒径階級 $j = 1$ の粒子の濃度は含まれていない。 $j = 2$ の粒子の鉛直分布は河床付近で濃度が急激に増加しており、 $j = 3$ の粒子の濃度と逆転する結果となった。このような結果を回避するためにはできる限り基準点付近で測定する必要がある。また、 $j = 2$ から 7 の浮遊砂 ($d > 0.016$ mm) は、鉛直方向の濃度分布をもっており、表面付近の採水では浮遊砂濃度の測定は困難であることが分かった。一方粒径階

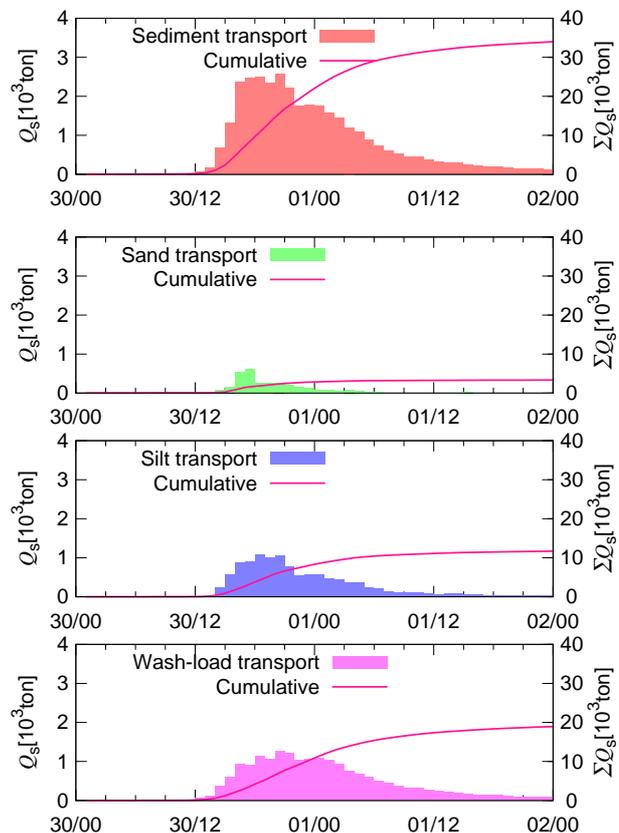


図-14 瀬戸石ダム地点の粒径区分別浮遊砂輸送量

級 $j = 8$ から 10 の浮遊砂 ($0.016 \text{ mm} \geq d$) の鉛直分布は水深方向にはほぼ一定であり、本論ではこの集団をウォッシュロードと呼んでいる。

(4) 流速分布

乱流状態にある開水路流れの場合には、流速の水深方向の分布は次式で与えられる。

$$\frac{u(y)}{\bar{U}} = 1 + \frac{2.5}{\varphi} \left(1 + \ln \frac{y}{h} \right), \quad \varphi = \frac{\bar{U}}{u_*} \quad (14)$$

表-3 平成 30 年台風 24 号による粒径区分別浮遊砂輸送量の観測結果 (2018/09/30-10/01)

粒径階級 j	平均粒径 d_j [mm]	浮遊砂輸送量 Σq_j [10^3 ton]		比率 [%]
1	1.414	0		
2	0.707	0.385		
3	0.354	0.072		
4	0.177	0.564		
5	0.0884	2.348	3.369	10
6	0.0442	4.890		
7	0.0221	6.795	11.685	34
8	0.0110	6.781		
9	0.00552	5.543		
10	0.00226	6.616	18.94	56
計		33.991		100

ここで表-2 に示す平均流速，摩擦速度を用いて算出した流速分布を図-13 に示す。

(5) 浮遊砂輸送量

平成 30 年台風 24 号による粒径区分別浮遊砂輸送量の観測結果を表-3 および図-14 に示す。浮遊砂輸送量は次式で算出した。

$$Q_s = \sum_{j=1}^{10} q_j, \quad q_j = L \sum_{y=a}^h u(y) C_j(y) dy \Delta t \quad (15)$$

ここで， Q_s は単位時間当たりの浮遊砂輸送量， q_j は単位時間当たり粒径階級 j の浮遊砂輸送量， $u(y)$ は河床からの距離 y での流速， $\Delta t = 3600$ である。9 月 30 日～10 月 1 日の 2 日間の浮遊砂輸送量は， 34×10^3 ton であり，その構成比率は砂分 ($d > 0.063$ mm) が 10%，シルト分 ($0.063 \geq d > 0.016$) が 34%，ウオッシュロード ($0.016 \text{ mm} \geq d$) が 56% となった。瀬戸石ダムを通過する浮遊砂には少なくとも 10% 程度の砂分が含まれており，洪水時のダム水位操作による瀬戸石ダムの通砂・排砂運用は八代海の干潟の砂質化に大きく寄与するものと考えられる。

5. 結論

本研究では，水中ポンプとフローセル型超音波減衰スペクトル計で構成する浮遊砂観測装置を用いて，球磨川瀬戸石ダム地点で浮遊砂観測を行った。本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 濃度と粒度分布の測定に適用する線形モデルに FB の減衰係数を付加し，等価粒径係数を定数として浮遊砂観測を行い，濃度・粒度分布ともに採水分析による測定値と同程度の測定結果が得られた。
2. 等価球形散乱体モデルに適用する等価粒径係数は，既往の研究から得られた $a_0 = 0.68$ ， $b_0 = 1.54$ ， $c_0 = 0.80$ を適用した。
3. UAS で測定した粒径区分別濃度の観測値から Rouse

分布を適用して鉛直分布を求め，瀬戸石ダムを通過した浮遊砂量を算出した。瀬戸石ダムを通過する浮遊砂には少なくとも 10% 程度の砂分が含まれており，洪水時のダム水位操作による瀬戸石ダムの通砂・排砂運用は八代海の干潟の砂質化に大きく寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) 例えば，吉村健，朝崎貴志，角哲也：河川の安全度を考慮した耳川水系におけるダム連携携砂方法の策定，土木学会論文集 B1(水工学)，Vo.74, No.4, I.961-I.966, 2018.
- 2) 大槻順朗，川崎貴志，二瓶泰雄，鬼倉徳雄：出水時球磨川における粒径別浮遊土砂輸送特性，土木学会論文集 B1(水工学)，Vo.69, No.4, I.1063-I.1068, 2013.
- 3) 川崎貴志，大槻順朗，二瓶泰雄，広瀬雄太郎，吉森佑介，鼻崎拓郎，伊豫岡宏樹，鬼倉徳雄：荒瀬ダム撤去評価に向けたダム湛水域・下流河川・干潟の土砂移動の調査と解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vo.71, No.4, I.979-I.984, 2014.
- 4) 古川仁志，小森歩，猪股重光，朝岡良浩，長林久夫：フローセル型超音波減衰スペクトル法による融雪出水期の浮流砂輸送量の観測方法の検証，土木学会論文集 B1(水工学)，Vo.74, No.4, I.607-I.612, 2018.
- 5) 古川仁志，小森歩，猪股重光，朝岡良浩，長林久夫：流水中のファインバブルが超音波による浮遊砂の濃度と粒度分布の測定に与える影響，土木学会論文集 B1(水工学)，Vo.74, No.5, I.817-I.822, 2018.
- 6) D.J.McClements: Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions, *Langmuir* 12, pp.3454-3461, 1996.
- 7) P.S.Epstein,R.R.Carhart: The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions, *J.Acoust.Soc.Am*,25,pp.553-565,1953.
- 8) J.R.Allegre,S.A.Hawley: Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions — Theory and Experiments, *J.Acoust.Soc.Am*,51,pp.1545-1564,1972.
- 9) 古川仁志，前田修一，猪股重光，田井秀一，小林力：水位低下による土砂スルーシグ時の超音波を用いた SS 濃度と粒度分布の連続計測，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.72, No.4, pp.I.919-I.924, 2016.
- 10) A. Richter, F. Babric, S. Ripperger: Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit, *J. Acoust.Soc.Am*, 118 (3), 2005.
- 11) 古川仁志，猪股重光，田井秀一，小林力：流水中の浮遊土砂の粒子形状が超音波減衰スペクトルに及ぼす影響，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.71, No.4, pp.I.817-I.822, 2015.
- 12) James J.Faran Jr.: Sound scattering by solid cylinders and spheres, *J.Acoust.Soc.Am*, 23(4), 1951.
- 13) S. Schaafsma,A.E.Hay: Attenuation in suspensions of irregularly shaped sediment particles : A two-parameter equivalent spherical scatterer model, *J.Acoust.Soc.Am*, 102(3), pp.1485-1502, 1996.
- 14) 古川仁志，猪股重光，田井秀一，小林力：超音波減衰スペクトル計による SS 測定に用いる等価球形散乱体モデルの検証，河川技術論文集，第 21 巻, pp.55-60, 2015.

(2019.4.2 受付)