

瀬戸石調整池における粒径区分別浮遊砂濃度の鉛直分布の観測と Rouse 分布の適用

日本大学工学部 正会員 ○ 古川 仁志
 電源開発 正会員 奥村 裕史
 日本大学工学部 正会員 朝岡 良浩

1. まえがき

流砂はその移動形態によって掃流砂、浮遊砂（ウォッシュロードを含む、以下同じ）に区分される。洪水時の観測は通常に採水によって行われるが、浮遊砂は鉛直方向に濃度分布を有するので、表面付近の採水だけでは細砂～粗砂の観測は難しい。本研究では古川ら^{1),2)}が開発し、実証試験を進めている超音波減衰スペクトル計による浮遊砂観測に適用する Rouse 分布を検証するため、瀬戸石調整池において粒径区分別濃度の鉛直分布を観測するとともに Rouse 分布の適用について考察する。

2. 浮遊砂の観測

(1) 浮遊砂輸送量

単位時間当たり浮遊砂輸送量 Q_s は次式で与えられる。

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

ここで、 q_j は粒径階級 j の浮遊砂輸送量、 m は粒径階級の総数、 L は河川幅、 h は水深、 a は河床から基準面までの高さ、 $u(y)$ は河床からの距離 y での流速、 $C_j(y)$ は河床からの距離 y での粒径階級 j の濃度である。

(2) 浮遊砂観測

観測地点は瀬戸石ダム（球磨川）から 280 m 上流の断面変化の少ない直線河道区間を選定した。観測地点の横断面と取水位置を図-1 に示す。観測期間中の瀬戸石ダムのハイドログラフを図-2 に示す。また、図-3 にガラス繊維濾紙法による浮遊砂濃度の観測結果を、図-4 にレーザ法による浮遊砂の粒度分布の観測結果の一例を示す。濃度と粒度は水深に依存して変化する。EL.42 m の浮遊砂濃度 (C_{42}) は EL.36 m の濃度 (C_{36}) の約 80% であり、また、EL.42 m の粒度は EL.36 m のものより粒径が小さい。

(3) 水理量の計算

表-1 に水理量の計算例（9 月 22 日 13 時）を示す。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）、平均流速 $\bar{U}$ は Q/A である。エネルギー勾配 I は粗度係数 $n = 0.038$ を用いてマンニングの平均流速公式から求めた。

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

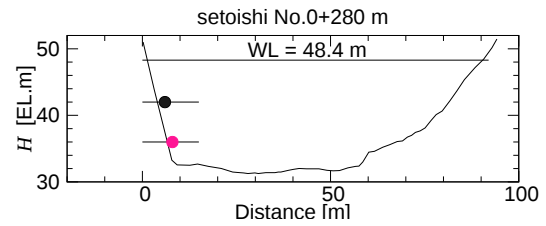


図-1 観測地点の横断面図

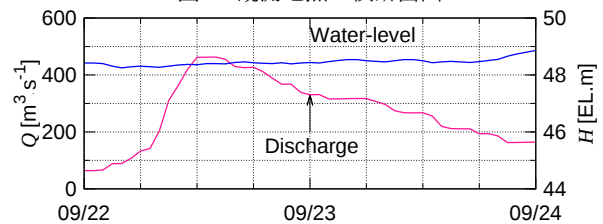


図-2 令和元年 9 月出水時の瀬戸石ダムのハイドログラフ

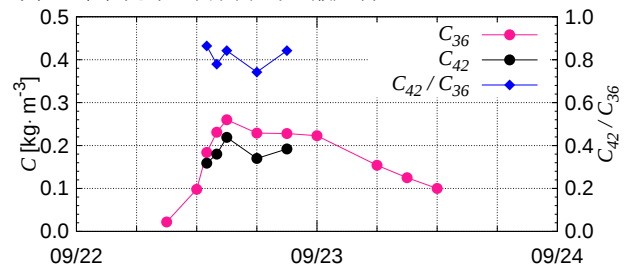


図-3 浮遊砂濃度の観測結果

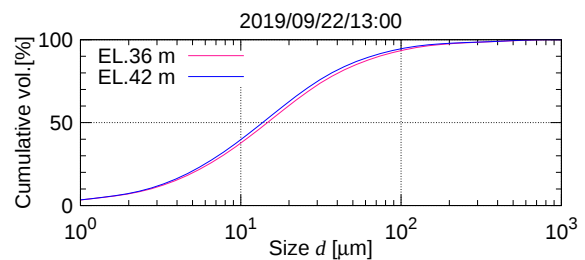


図-4 浮遊砂の粒度分布

(4) 粒径区分別濃度

表-2 に粒径区分別濃度の観測例を示す。粒径階級 j の粒径区分別濃度 C_j の観測値は次式で算出した。

$$C_j = C \cdot g(d_j) \Delta x \quad (3)$$

ここで、 C は浮遊砂濃度、 $g(d_j) \Delta x$ は粒径階級 j の粒子の体積比率である。

3. 考察

等流・乱流状態にある流れの場合、浮遊砂の濃度分布式は基準点 $y = a$ における濃度を $C = C_a$ とすると、次

表-1 水理量の計算結果 (2019/09/22/13:00)

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]	水深 h [m]	エネルギー勾配 I	摩擦速度 u_* [m·s ⁻¹]
48.40	462.6	1173.7	89.35	104.15	11.27	0.394	15.8	8.87×10^{-6}	0.0371

表-2 粒径区分別浮遊砂濃度と Rouse 数 (2019/09/22/13:00)

粒径階級 j	粒径範囲 [mm]	平均粒径 d_j [mm]	C_{36} C_j [kg·m ⁻³]	C_{42} C_j [kg·m ⁻³]	δd_j	沈降速度 ω_f [m·s ⁻¹]	$\omega_f u_*^{-1}$	Rouse 数 Z
1	$2.000 \geq d > 1.000$	1.414	0.000	0.000	0.9899	0.095824	2.585278	6.463195
2	$1.000 \geq d > 0.500$	0.707	0.001	0.001	0.4950	0.060785	1.639953	4.099883
3	$0.500 \geq d > 0.250$	0.354	0.002	0.002	0.2475	0.032049	0.864675	2.161686
4	$0.250 \geq d > 0.125$	0.177	0.005	0.004	0.1237	0.011847	0.319615	0.799038
5	$0.125 \geq d > 0.063$	0.0884	0.014	0.012	0.0619	0.003267	0.088149	0.220372
6	$0.063 \geq d > 0.032$	0.0442	0.026	0.025	0.0309	0.000829	0.022359	0.055899
7	$0.032 \geq d > 0.016$	0.0221	0.040	0.039	0.0155	0.000208	0.005600	0.014001
8	$0.016 \geq d > 0.008$	0.0110	0.040	0.041	0.0077	0.000052	0.001400	0.003501
9	$0.008 \geq d > 0.004$	0.00552	0.028	0.030	0.0039	0.000013	0.000350	0.000875
10	$0.004 \geq d > 0.002$	0.00276	0.015	0.016	0.0019	0.000003	0.000088	0.000219
11	$0.002 \geq d > 0.001$	0.00138	0.007	0.007	0.0010	0.000001	0.000022	0.000055
12	$0.001 \geq d > 0.0005$	0.00069	0.005	0.005	0.0005	0.000000	0.000005	0.000014
13	$0.0005 \geq d$	0.00035	0.001	0.001	0.0002	0.000000	0.000001	0.000003
計			0.184	0.159				

式で与えられる。

$$\frac{C(y)}{C_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^Z, \quad Z = \frac{\omega_f}{\kappa u_*} \quad (4)$$

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。 Z は Rouse 数、 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。 $u_* (= \sqrt{ghI})$ は摩擦速度である。沈降速度 ω_f は Rubey の実験式から求める。

$$\frac{\omega_f}{\sqrt{sg(\delta d)}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sg(\delta d)^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sg(\delta d)^3}} \quad (5)$$

ここで、 ν は水の動粘性係数、 s は砂粒子の水中比重、 d は砂粒子の粒径、 δ は補正係数、 g は重力加速度である。

EL.36 m と EL.42 m の粒径区分別濃度の観測値および Rouse 分布による計算値を図-5 に示す。Rouse 分布は $h = 15.8$ m, $a = 0.3$ m, $\delta = 0.7$ を用いて求めた。Rouse 数の計算結果を表-2 に示す。浮遊砂の観測では、濃度の鉛直方向の変化が大きい粒径階級 $j = 1 \sim 5$ の粒子の濃度分布が重要であり、Rouse 数はこれらの観測データから決定する必要がある。粒径階級 $j = 3$ の砂粒子 1 個の重量 w は砂粒子の密度を $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ とすると 0.5 mg であり、サンプルの必要量を粒子 10 個以上とすると約 5 mg となる。これを 1ℓ の採水量で確保する場合、粒径区分別濃度は $5 \text{ mg} \ell^{-1} = 0.005 \text{ kg m}^{-3}$ 以上必要であるが、図-5 に示す濃度はこれに達していない。したがって粒径階級 $j = 1 \sim 3$ の測定値から最適な適切な Rouse 数を決定することは難しいため、粒径階級 $j = 4 \sim 6$ の粒径区分別濃度の測定値にフィットするラウス数 (補正係数 δ) を決定した。

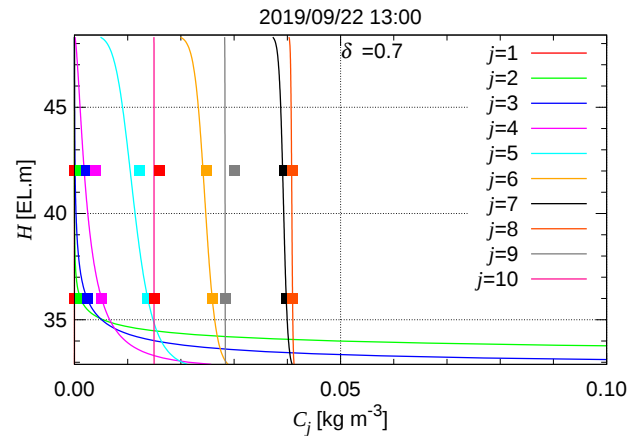


図-5 粒径区分別濃度の鉛直分布

4. 結論

本研究で得られた知見は以下のとおりである。浮遊砂輸送量を観測するためには、浮遊砂濃度の鉛直分布を測定する必要がある。観測値にフィットする Rouse 数を決定する方法として、粒径補正係数を導入する方法を提案した。今回の観測では浮遊砂濃度が $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 程度であり、粒径 $d \geq 0.25 \text{ mm}$ では正確な濃度の測定ができないため、 $0.032 < d \leq 0.25 \text{ mm}$ の粒径区分別濃度の測定値から Rouse 数を決定した。Rouse 数はより高濃度の観測値から決定することが望ましい。

参考文献

- 古川仁志, 福重裕史, 河下重和, 朝岡良浩, 長林久夫: 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. 河川技術論文集. 第 25 巻, pp.163-168, 2019.
- 古川仁志, 福重裕史, 奥村裕史, 朝岡良浩, 長林久夫: 球磨川・瀬戸石ダムの通砂/排砂運用期間中の粒径区分別浮遊砂輸送量の観測. 土木学会論文集 B1 (水工学). Vol.75, No.2, pp.1853-1858, 2019.