超音波減衰スペクトル計による 球磨川の土砂流出量の観測 OBSERVATION OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN THE KUMAGAWA RIVER USING AN ULTRASONIC ATTENUATION SPECTROMETER

古川仁志¹ · 福重裕史² · 奧村裕史³ · 朝岡良浩⁴ · 長林久夫⁵ Hitoshi FURUKAWA, Yuuji FUKUSHIGE, Hirofumi OKUMURA, 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 正会員 博(工) 電源開発株式会社 土木建築部ダム整備室総括 M(〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)
 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 a river 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. Suspended sediment was measured during four flood events in 2018 and 2019. The suspended sediment discharge hysteresis was analyzed, and it was found that there were clockwise, counterclockwise, and intermediate cases of hysteresis at Setoishi Dam. During sluicing operations, the Setoishi reservoir changes to a river channel. Clockwise hysteresis was present at the first flush in the river channel, intermediate hysteresis in the river channel after the first flush, and counterclockwise hysteresis in the suspended sediment discharge in the reservoir. The amount of suspended sediment transport due to sluicing operations in 2019 was 183.5×10^3 m³. This comprised sand content of 23.5×10^3 m³(12.8%), coarse silt of 57.5×10^3 m³(31.3%), and wash load of 102.6×10^3 m³(55.9%).

Key Words: Ultrasonic attenuation spectrometer, non-uniform suspended sediment transport, sluicing operation, suspended sediment discharge hysteresis, the Kumagawa River

1. まえがき

流砂はその移動形態によって掃流砂、浮遊砂および wash load に区分される。掃流砂量、浮遊砂量に関する 研究は古くから行われ、現在に至るまで多くの流砂量 式が提案されている.また,浮遊砂観測については,建 設省(当時)が1964~1969年にかけて全国の直轄河川 で浮遊砂量の観測を行い、その成果は流量 Q と実測浮 遊砂量 Q_s との関係として公表¹⁾ されている. 観測地 点の浮遊砂量は Q-Q。式および年間の流量データから 算出する. 採水による浮遊砂の観測は連続観測が困難 なので,連続観測が可能な光学式濁度計の測定値(濁 度 TU)とガラス繊維濾紙法で測定した SS との関係式 (TU-SS 式)に基づき、濁度から浮遊砂量を推定する方 法が採用される.しかし、TU-SS 式は粒径によって違 いがあり, $Q - Q_s$ 関係はヒステリシスをもつので推定 誤差が避けられない.古川ら^{2,3,4)}は浮遊砂濃度を連続 して直接測定できる超音波減衰スペクトル計を開発し, 2019年から球磨川・瀬戸石ダムで本格的な浮遊砂観測 を開始した. 2019年には瀬戸石ダムで2000m³·s⁻¹級

の出水が2回,3000 m³·s⁻¹ 級の出水が1回あり,2回 の通砂/排砂運用が行われた.本論文ではこれらの通 砂/排砂運用中の $Q - Q_s$ 関係を検証するとともに瀬戸 石ダムからの粒径別年間土砂流出量を推定する.

2. 瀬戸石ダム通砂/排砂運用の概要

瀬戸石ダムは 1958 年 (昭和 33 年) に電源開発が一級 河川球磨川に建設した発電専用ダムである.図-1 に瀬戸 石ダムの位置図を示す.ダムサイトは河口から約 30 km 上流にあり,流域面積は 1629.3 km²,高さ 26.5 m,洪 水吐ゲート 5 門を有する.瀬戸石ダムでは堆砂対策と してこれまで渇水期に調整池を空にして堆積土砂の掘 削および土砂搬出を行ってきた.近年ではこれに加え て土砂管理の一環として通砂/排砂運用が行われてい る.通砂/排砂運用は,出水時にダム水位を計画的に 低下させ,調整池を河道の状態に変えて上流から調整 池に流入する土砂を流水によって下流に通過させよう とするものである.また,この通砂/排砂運用を評価 するため,超音波減衰スペクトル計による浮遊砂観測



図-1 球磨川流域図

を実施している. 観測地点はダム軸から 280 m 上流左 岸で,護岸のよう壁の標高 EL.36.00 m の位置に水中ポ ンプ(1.5 kW)を設置して,約 250 ℓ・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 分間隔で測定する.

観測地点の断面図を図-2 に示す.通砂/排砂運 用水位 (Sluiciong Operational Water Level,SOWL) は EL.44.00 m で水深は約 12.0 m,水中ポンプの取水位置 は河床高+約 4.0 m である.採水分析用の試料は水中ポ ンプで取水した濁水を原則として 3 時間毎に 2ℓ採水す る.試料の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)によって測定し,この測定値で超音波減衰スペク トル計のキャリブレーションを実施する.2018,2019 年の出水時の瀬戸石ダムのハイドログラフと運用水位 を図-3 に示す.運用水位はダム水位計の測定値を示す. 出水イベント 2018-E.4 は通常のダム操作,出水イベン ト 2019-E.1, 2019-E.2 および 2019-E.3 はそれぞれ通砂 /排砂運用を実施している.

3. 超音波減衰スペクトル計による浮遊砂観測

浮遊砂濃度 c は容積表示で次式 5) で定義される.

$$c = \frac{Q_s}{Q} \tag{1}$$

ここで,Qは流量 [m³·s⁻¹], Q_s はその流量中の浮遊砂量 [m³·s⁻¹] である. 超音波減衰スペクトル法⁶⁾ (Ultrasonic Attenuation Spectroscopy) 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 づき浮遊砂濃度と各粒径階級の体積比率 (粒度分布)を逆 解析で求める方法である.減衰スペクトルの測定値と理 論値との残差平方和 (sum of squares of differences,SSD) が最小となる理論値に含まれる濃度と各粒径階級の体



図-3 出水時の瀬戸石ダムのハイドログラフと運用水位 (2018-2019)

積比率が測定値となる. SSD は次式で算出する.

$$SSD = \sum_{i} [\alpha_{\text{meas}}(f_i) - \alpha_{\text{th}}(f_i)]^2$$
(2)

ここで, $\alpha_{\text{meas}}(f_i)$ は周波数 f_i での減衰係数の測定値, $\alpha_{\text{th}}(f_i)$ は減衰係数の理論値で次式⁴⁾で与えられる.

$$\alpha_{\rm th}(f_i) = \alpha_{\rm p}(f_i) + \alpha_{\rm fb}(f_i) + \alpha_{\rm fc}(f_i) + \alpha_{\rm sta}(f_i) \qquad (3)$$

ここで,

$$\alpha_{\rm p}(f_i) = c \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) g(d_j) \Delta x \tag{4}$$

 $\alpha_{p}(f_{i})$ は周波数 f_{i} での浮遊砂粒子による減衰係数, $K(f_{i}, d_{j})$ 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⁹⁾と呼んでいる. $g(d_{j})\Delta x$ は粒径 d_{j} の粒 子の体積比率, jは粒径階級, mは粒径階級の総数であ る. $\alpha_{fb}(f_{i})$ は FB による減衰係数, $\alpha_{fc}(f_{i})$ はフローセル

粒径階級	粒径範囲	平均粒径	全体積濃度	体積比率	粒径別体積濃度	粒径別質量濃度
j	[mm]	d_j [mm]	$c [\times 10^{-6}]$	$g(d_j)\Delta x[\%]$	$c_j[\times 10^{-6}]$	$C_j[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
1	$2.000 \ge d > 1.000$	1.414		0.0	0.0	0.000
2	$1.000 \ge d > 0.500$	0.707		1.1	5.2	0.013
3	$0.500 \ge d > 0.250$	0.354		5.1	24.3	0.063
4	$0.250 \ge d > 0.125$	0.177		9.3	44.4	0.114
5	$0.125 \ge d > 0.063$	0.0884		12.4	59.1	0.152
6	$0.063 \ge d > 0.032$	0.0442		16.7	79.7	0.205
7	$0.032 \ge d > 0.016$	0.0221		20.1	95.9	0.246
8	$0.016 \ge d > 0.008$	0.0110		16.5	78.7	0.202
9	$0.008 \ge d > 0.004$	0.00552		9.9	47.2	0.121
10	$0.004 \ge d$	0.00226		8.9	42.5	0.109
			477	100.0	477.0	1.226

表-1 粒径別濃度の測定結果 (2019/06/30/18:00)

表-2 水理量の計算結果

測定日時	水位	流量	流積	潤辺長	径深	平均流速	水深	エネルギー勾配	摩擦速度
	<i>H</i> [EL.m]	$Q[m^3]$	$A [m^2]$	S [m]	<i>R</i> [m]	\bar{U} [m·s ⁻¹]	<i>h</i> [m]	I_e	$u_{\star} [\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}]$
2019/06/30/18:00	44.12	1431.3	816.37	91.85	8.89	1.753	12.12	2.41 E-4	0.169

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. $\alpha_{fc}(f_i)$ は実験式から算出する. $\alpha_{sta}(f_i)$ 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.なお、測定方法の詳細は既報^{2,3,4)}のとおりである. 次に、粒径別濃度の算出について述べる.超音波減衰 スペクトル計の測定値は式(4)に含まれる $c \ge g(d_j)\Delta x$ である.粒径別濃度は浮遊砂濃度 $c \ge \delta$ 本粒径の粒子の 体積比率 $g(d_j)\Delta x$ から求める.また、質量濃度Cは浮 遊砂濃度cに浮遊砂粒子の密度 ρ_2 を乗じて算出する. 瀬戸石ダムで採取した球磨川の浮遊砂粒子の密度 ρ_2 は 2570kg·m⁻³である.粒径別濃度の観測データの一例を 表-1に示す.粒径階級は ϕ スケールを採用し、平均粒 径は幾何平均を用いている.

4. 浮遊砂量の計算

(1) 浮遊砂量

定常 2 次元等流を考えた場合の単位幅当たりの浮遊 砂量 *q*_s は,濃度分布 *c*(*z*) および流速分布 *u*(*z*) が決定さ れれば次式で与えられる.

$$q_s = \sum_{z=a}^{h} c(z)u(z)dz$$
(5)

ここで,*h*は水深,*c*(*z*)は河床面上 z の点における浮遊 砂濃度,*a*は濃度の基準点とされる河床面からの高さで ある.流速の鉛直方向の分布は乱流状態にある開水路 流れの場合には次式で与えられる¹⁰⁾.

$$\frac{u(z)}{\bar{U}} = 1 + \frac{2.5}{\varphi} \left(1 + \ln \frac{z}{h} \right), \quad \varphi = \frac{U}{u_{\star}} \tag{6}$$

ここで, \bar{U} は平均流速, $u_{\star}(=\sqrt{ghI_e})$ は摩擦速度,gは重力加速度, I_e はエネルギー勾配である.

(2) 浮遊砂濃度の鉛直分布 (Rouse 分布)

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z = aにおける濃度を $c = c_a$ とすると,次 式で与えられる.

$$\frac{c(z)}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z}\frac{a}{h-a}\right)^Z, \quad Z = \frac{\omega_f}{\beta\kappa u_\star} \tag{7}$$

ここで, c_a は基準面濃度, 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. 沈降速度 ω_f は次式に示す Rubey の実験式から求める.

$$\frac{\omega_f}{\sqrt{sg(\delta d)}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sg(\delta d)^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sg(\delta d)^3}}$$
(8)

ここで、v は水の動粘性係数、 δ は濃度の鉛直分布を実 測値を用いて補正するための粒径補正係数で、古川ら ¹¹⁾の観測によれば $\delta = 0.7$ が得られている.実際の観 測では、河床面からの高さzにおける濃度c(z)を測定 すれば基準面濃度は次式で求められる.

$$c_a = c(z) \cdot \left(\frac{h-z}{z}\frac{a}{h-a}\right)^{-Z} \tag{9}$$

(3) 水理量の計算

図-2 に示す観測地点の水理量は1時間毎に瀬戸石ダム水位と放流量の観測値から算出した.水理量の計算例 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 Ū は



図-4 流量と浮遊砂量との関係(球磨川 瀬戸石ダム 2018-2019)

Q/A,水深hは平均河床高 H_0 = 32.00 m から水面まで の距離である.エネルギー勾配 I_e は粗度係数n = 0.038 を用いてマニングの平均流速公式から次式で求めた.

$$I_e = \left(\frac{\bar{U} \cdot n}{R^{2/3}}\right)^2 \tag{10}$$

(4) 浮遊砂量の計算

図-2 に浮遊砂量の計算断面を示す.計算断面は平均 河床高 (*H*₀ = 32.00 m) を底辺とする矩形断面で水深 *h*, 河川幅 *B* は *A*/*h* で求める.また,基準面の高さは通常は a = 0.05hが用いられるが,ここではa = 0.10 mとした. t時における粒径階級 jの粒子の浮遊砂量 $Q_{sj}(t)$ [m³·s⁻¹] は次式で算出する.

$$Q_{sj}(t) = B \cdot q_s \tag{11}$$

また、全浮遊砂量 $Q_s(t)$ は次式で算出する.

$$Q_{s}(t) = \sum_{j=1}^{m} Q_{sj}(t)$$
 (12)

ここで, m は粒径階級の総数 (m = 10) である.



図-5 瀬戸石調整池背水計算結果:ダム水位 EL.47.45 m(左) とダム水位 EL.44.00 m(右)

粒径階級	粒径範囲	第1回通砂/排砂運用	第2回通砂/排砂運用	合 計	粒径集団別	比 率
j	[mm]	$[10^3 \text{ m}^3]$	$[10^3 \text{ m}^3]$	$[10^3 \text{ m}^3]$	$[10^3 \mathrm{m}^3]$	[%]
1	$2.000 \ge d > 1.000$	0.0	0.0	0.0		
2	$1.000 \ge d > 0.500$	0.7	0.1	0.8		
3	$0.500 \ge d > 0.250$	2.2	0.6	2.8		
4	$0.250 \ge d > 0.125$	3.8	1.6	5.4	(砂)	
5	$0.125 \ge d > 0.063$	8.5	6.0	14.5	23.5	12.8
6	$0.063 \ge d > 0.032$	14.7	9.9	24.6	(粗粒シルト)	
7	$0.032 \ge d > 0.016$	19.7	13.2	32.9	57.5	31.3
8	$0.016 \ge d > 0.008$	20.1	14.7	34.8		
9	$0.008 \ge d > 0.004$	17.1	13.2	30.3	(Wash load)	
10	$0.004 \ge d$	21.4	16.1	37.5	102.6	55.9
計		108.2	75.3	183.5		100.0

表-3 瀬戸石ダムからの土砂流出量 (2019)

(5) 流量と浮遊砂量との関係

瀬戸石ダム地点における流量と浮遊砂量との関係を 図-4 に示す.図-4 は多くの直轄河川で出水時に観測し た結果¹⁾に式(12)で算出した全浮遊砂量を1時間毎に プロットしたものである.各出水イベント毎に流量と 浮遊砂量との関係にはそれぞれの特徴があることが分 かった.2018-E.4 では,流量と浮遊砂量との関係は反 時計回りのヒステリシスを描くことが分かった.また, 2019-E.1 では,流量と浮遊砂量との関係は時計回りの 大きなヒステリシスを描いている.さらに2019-E.2 お よび E.3 では,時計回りのヒステリシスが見られるが, 増水時,減水時ともにほぼ直線的に変化していること が分かった.

ダムサイトにおける反時計回りのヒステリシスは坊野 ら¹²⁾によって観測されており、その原因は調整池上流端 に流入した浮遊砂がダム地点に到達するまでに時間を要 するためである.2018-E.4 は最大流入量が1128 m³·s⁻¹, 最大流入量発生時の水位が EL.47.45 m(予備放流水位) で、標準的なダム操作を実施したケースである.この 反時計回りのヒステリシスを検証するため、ダム水位 を予備放流水位とし、流入量を 200~4000 m³·s⁻¹ とし て背水計算を実施した結果を図-5(左) に示す.計算方 法は一次元不等流解析、粗度係数は n = 0.0038 を用い た.ダム水位を予備放流水位として洪水に対処する場 合、流入量が 1000 m³·s⁻¹ の場合は長さ約 4 km の調整 池であり、浮遊砂の移動速度が平均流速と等しいと考 えると、ダム地点に到達するまでには最短でも 2 時間 以上を要する.また、流量が小さくなるにしたがって 到達時間は長くなるので調整池の状態が維持される場 合は反時計回りのヒステリシスを描くことになる.

次に、時計回りのヒステリシスについては古川ら¹³⁾ の伊南川の融雪出水時に観測されている. 2019-E.1 は, 浮遊砂量のピークが流量がピークに達するまえに発生 しており, いわゆるファーストフラッシュと考えられ る. この現象は前年の出水により調整池や河道に沈降・ 堆積したシルトや wash load が第1回通砂/排砂運用に よって流出したものである.伊南川の観測は河道で実施 されており, 通砂/排砂運用時の調整池の状況を検証す るため、ダム水位を通砂/排砂運用水位 EL.44.00 m と した背水計算結果を図-5(右)に示す。同図から通砂/排 砂運用時は、瀬戸石調整池は河道の状態に移行してい ることが分かった. 流入量が1000 m³·s⁻¹ の場合は調整 池の長さが約2kmになり、浮遊砂は約20分でダムに到 達する. 2019-E.1 は流量が1500~2000 m³·s⁻¹ であり, 河道状態でファーストフラッシュが発生したと考えられ る. 2019-E.2 および E.3 は流量が 2000~3000 m³·s⁻¹ でありファーストフラッシュ後の河道での流量と浮遊 砂量との関係を示しており、この場合は中間的なヒス テリシスを描き,流量と浮遊砂量との関係はほぼ直線 となる.

(6) 土砂流出量

t 時における粒径階級 *j* の粒子の単位時間当たりの土 砂流出量 *Q_{st i}(t)*[m³] は次式で求められる.

$$Q_{st\,i}(t) = Q_{s\,i}(t) \cdot \Delta t \tag{13}$$



図-6 瀬戸石ダムからの粒径集団別土砂流出量 (2019)

ここで、 $\Delta t = 3600 \sec$ である.また、粒径階級 $j = 1 \sim 10$ の全粒径階級の土砂流出量は次式で与えられる.

$$Q_{st}(t) = \sum_{j=1}^{10} Q_{st\,j}(t) \tag{14}$$

表-3 に通砂/排砂運用による粒径別土砂流出量の計算結 果を示す.第1回通砂/排砂運用による全土砂流出量は 108.2×10³ m³,第2回では75.3×10³ m³,合計183.5× 10³ m³となった.また,粒径集団別では砂(2.000 ≥ d > 0.063)が23.5×10³ m³(12.8%),粗粒シルト(0.0063 ≥ d > 0.016)が57.5×10³ m³(31.3%), wash load(0.0016 ≥ d)が102.6×10³ m³(55.9%)となった.次に第1回およ び第2回通砂/排砂運用による単位時間当たりの粒径集 団別土砂流出量の時間変化を図-6に示す.単位時間当 たりの全土砂流出量のピークは出水イベント2019-E.1 では Q_s = 4475 m³,同 E.2 では Q_s = 3339 m³,同 E.3 では Q_s = 13263 m³となった.砂は掃流砂として流出 していることが考えられるので,浮遊砂量と掃流砂量 を合わせて評価する必要がある.

5. 結論

本研究で得られた主な成果は以下のとおりである.

- 1. 瀬戸石ダム地点の流量と浮遊砂量との関係は,反時計回りのヒステリシス,時計回りのヒステリシ スおよび中間的な直線がそれぞれ観測された.
- 反時計回りのヒステリシスはダム水位が高い場合 に見られ,調整池上流端に流入した浮遊砂が観測 地点に到達するまでに時間を要することが原因で ある.
- 3.時計回りのヒステリシスは 2019 年第1回通砂/排 砂運用で観測されており、調整池内および河道内 に堆積したシルトや wash load が排出されるいわゆ る「ファーストフラッシュ」現象と考えられる.
- 中間的なヒステリシスは通砂/排砂運用中に観測 されている.通砂/排砂運用中は瀬戸石調整池は 「河道」の状態に変化しており、河道の状態では Q と Q_s関係は直線的に変化する.
- 5. 2019 年の通砂/排砂運用によって瀬戸石ダムから 約 180 000 m³ の土砂が下流に流出し,その粒度構 成は砂が 12.8 %,粗粒シルトが 31.3 %, wash load

が 55.9% である.

- 参考文献
- 建設省河川局監修日本河川協会編:改訂新版建設省河川 砂防技術基準(案)同解説調査編,p282,山海堂,1997.
- 2) 古川仁志,奥村裕史,田井秀一,小林力:超音波による 浮遊砂濃度と粒度分布の測定に用いるファインバブルの 影響を考慮した線形モデルの評価.電子情報通信学会技 術報告.US2019-92, pp.119-124, 2020.
- 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.I_853-I_858,2019.
- 4) 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.
- 5) 荒井信行,清水康行:現場のための水理学(4) 浮遊砂 と河床変動—,国土交通省寒地土木研究所.
- D.J.McClements: Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions, *Langmuir* 12, pp.3454-3461, 1996.
- P.S.Epstein, R.R.Carhart: The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions, J.Acoust.Soc.Am, 25, pp. 553-565, 1953.
- J.R.Allegra,S.A.Hawley: Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions —- Theory and Experiments, J.Acoust.Soc.Am,51,pp.1545-1564,1972.
- 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.
- 10) 荒木正夫, 椿東一郎: 水理学演習下巻,p204, 森北出版, 2000.
- 11) 古川仁志, 奥村裕史, 朝岡良浩: 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, 土木学会東北支部技術研究発表会 (令和元年度),II-48, 2020.
- 12) 坊野聡子, 清水康行, 黒木幹夫, 藤田睦博, 吉田義一: ダム を含む河川の流砂と河床変動に関する研究, 土木学会論 文集 No.656, II-52, pp.61-72, 2000.
- 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, pp.I_607-I_612, 2018.

(2020.4.2 受付)