

多峰性対数正規分布モデルを用いた FC型超音波減衰スペクトル計による 浮遊砂粒度分布の現地測定

古川仁志（日本大学工学部）
平 和敏（電源開発 東日本支店）
朝岡良浩（日本大学工学部）

2026/06/18-19
2026 年度 河川技術シンポジウム

本日の発表内容

1. 背景・目的
2. 浮遊砂観測
3. PSD モデルの生成
4. 測定結果
5. 考察
6. 結論

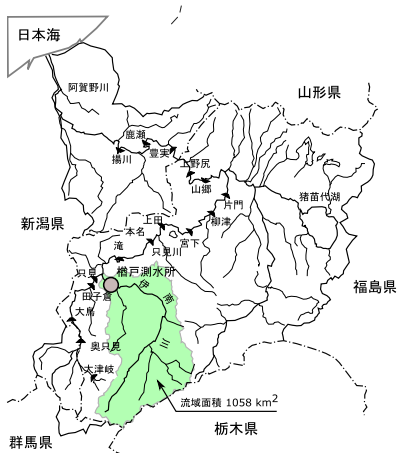
1. 背景・目的

- ▶ 我が国の**発電専用ダム**のうち総貯水容量 $1,000$ 万 m^3 以上のものは 113 ダム. その約 20% のダムは全堆砂率 30% 以上. 上流から貯水池に流入する**土砂の管理**は重要な課題.
- ▶ 本研究では**河道を通過する浮遊砂量を測定する観測システム**の開発を目的とする.
- ▶ LISST-SL2[1](Sequoia Scientific, Inc.) は**レーザー回折法**を用いた浮遊砂観測装置. 粒径 $1\sim 500\ \mu\text{m}$ の 36 粒径階級の粒度分布を測定できるが, 測定可能な濃度には限界がある.
- ▶ 超音波減衰スペクトル計 [2] は**超音波減衰スペクトル法**を用いた浮遊砂観測装置. サンプルの希釈なしで高濃度の濁水中の濃度と粒度分布を同時に計測.
- ▶ **フローセル (FC) 型超音波減衰スペクトル計** [3, 4] はポンプによる採水と超音波減衰スペクトル計を組み合わせた観測システム. 粒径 $0.1\ \mu\text{m}\sim 2.0\ \text{mm}$ の 58 粒径の粒度分布が測定できる. 従来の方法ではサンプルの粒度分布をモデルとして適用しており、**合理的な粒度分布 (PSD) モデルの生成が課題**.
- ▶ 本研究では、**多峰性対数正規分布モデル**を用いて PSD モデルを生成し、このモデルによる測定精度の改善効果を検証した.

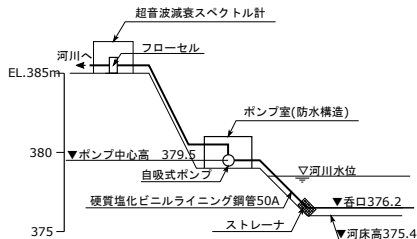
2. 浮遊砂観測

(1) 観測施設

観測地点は櫛戸測水所（福島県只見町）



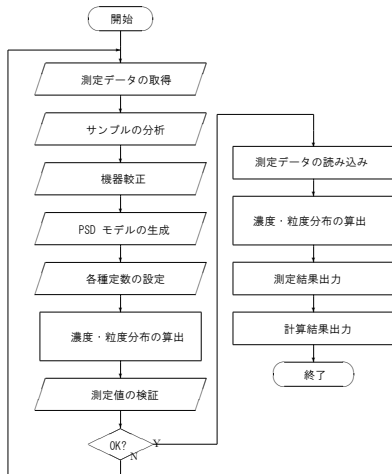
観測システムの概要は以下のとおり



- ▶ 自吸式ポンプ (1.5kW) で連続して約 180ℓ/min の河川水を取水
- ▶ FC を通過する流水中の土砂濃度と粒度分布を 10 分間隔で自動計測

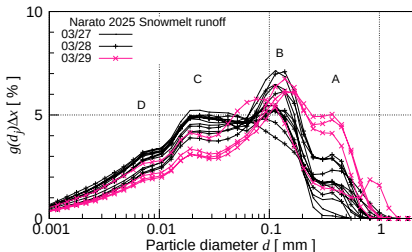
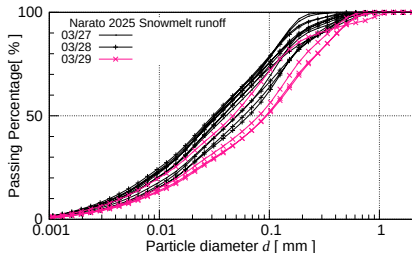
(2) 測定手順

濃度と粒度分布の測定手順は以下のとおり。



(3) サンプルング [5]

- ▶ ポンプで取水した流水を 3 時間毎に **1 検体当たり約 18ℓ 採取**
- ▶ 重量を計測した後 24 時間以上静置し，上澄みを捨て 2ℓ の容器に詰めて分析機関に輸送．土砂濃度と粒度分布を測定
- ▶ サンプルに含まれる有機物は上澄み水と一緒に捨て，土粒子のみを採取
- ▶ **濃度：蒸発法** (Evaporation method, 「EVP」) による**全量分析**で測定
- ▶ **粒度分布：**
サンプルを 0.075 mm **フルイ**で分級し，それぞれの検体を**レーザー法**で測定し，その体積比率を質量比で按分して**合成粒度分布**を算出



2025 年 3 月に採取した浮遊砂サンプルの
粒度分布の特性は以下のとおり

▶ 産地・輸送経路および粒径の異なる
4 つの粒径集団で構成

- ▶ A：中央粒径約 0.4mm の
中砂
- ▶ B：0.1 ～ 0.2mm の細砂
- ▶ C：0.02mm の中粒シ
ルト
- ▶ D：0.008mm の微細粒シ
ルト

- ▶ 平均粒径 (50%粒径)：0.03～0.1 mm
- ▶ モード径：0.1～0.2mm
一部に 0.02～0.04 mm のサンプル

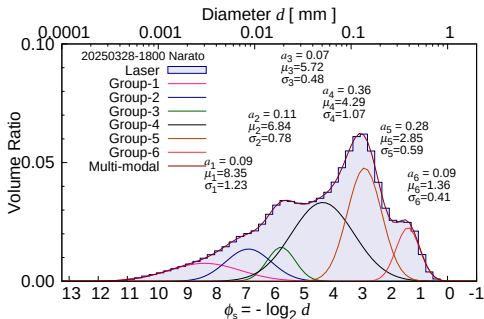
3. PSD モデルの生成

(1) 成分分離

粒度分布に多峰性対数正規分布モデルを適用して 6 グループに成分分離．

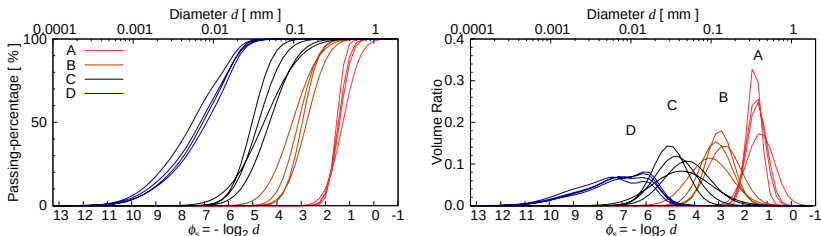
$$g(d_j)\Delta x = \left(\sum_{i=1}^n a_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \right) \Delta x, \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1.0 \quad (1)$$

ここで $g(d_j)\Delta x$ は粒径 d_j の体積比率， n は対数正規分布の数 ($n=6$)， a_i はグループ i の構成比率， $x_j = \log_2(d_j)$ ， μ_i は平均粒径， σ_i は分散， $\Delta x = 0.250$ ．



(2) PSD モデルの生成

- ▶ グループ 1~6 を **4 集団 (ABCD)** に再編. 各集団の代表的な PSD モデルを次に示す.



- ▶ **A~D 集団の各モデルを次式に適用して約 11,000 の PSD モデルを生成**

$$g(d_j)\Delta x = p(A) \cdot g_A(d_j)\Delta x + p(B) \cdot g_B(d_j)\Delta x + p(C) \cdot g_C(d_j)\Delta x + p(D) \cdot g_D(d_j)\Delta x \quad (2)$$

$$p(A) + p(B) + p(C) + p(D) = 1.0 \quad (3)$$

ここで, $g_A(d_j)\Delta x$, $g_B(d_j)\Delta x$, $g_C(d_j)\Delta x$ および $g_D(d_j)\Delta x$ は A~D の各集団の粒径 d_j [mm] の体積比率, $p(A)$, $p(B)$, $p(C)$ および $p(D)$ は各集団の構成比率.

4. 測定結果

(1) 濃度と粒度分布の算出

減衰スペクトルの測定値と理論値との残差平方和 (SSD) を算出し、SSD が最小となる理論値に含まれる固液体積分率と PSD モデル (各粒径階級の体積比率) を反復計算によって算出。

$$SSD = \sum_{i=1}^N [\alpha_{\text{meas}}(f_i) - \alpha_{\text{th}}(f_i)]^2 \quad (4)$$

$$\alpha_{\text{meas}}(f_i) = -\frac{1}{2L} \ln \frac{A(f_i)}{A_0(f_i)} \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{th}}(f_i) = \alpha_p(f_i) + \alpha_{\text{mb}}(f_i) + \alpha_{\text{cav}}(f_i) + \alpha_{\text{sta}}(f_i) \quad (6)$$

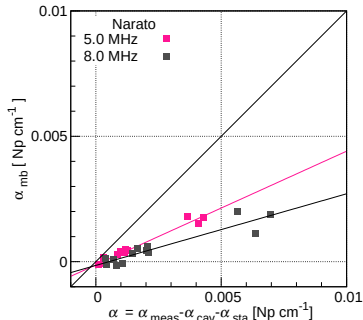
$$\alpha_p(f_i) = \phi \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) \cdot g(d_j) \Delta x \quad (7)$$

ここで、 N は測定周波数の総数 ($N = 11$)、 $\alpha_{\text{meas}}(f_i)$ 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。 L は振動子と反射板との間の距離、 $A(f_i)$ は周波数 f_i での超音波減衰スペクトル計の測定値 (振幅)、 $A_0(f_i)$ は周波数 f_i での基準スペクトルの振幅。 $\alpha_p(f_i)$ は周波数 f_i での土粒子による減衰係数、 $\alpha_{\text{mb}}(f_i)$ は MB による減衰係数 [5, 6]、MB 減衰特性方程式から算出。 $\alpha_{\text{cav}}(f_i)$ は FC 内で発生するキャビ

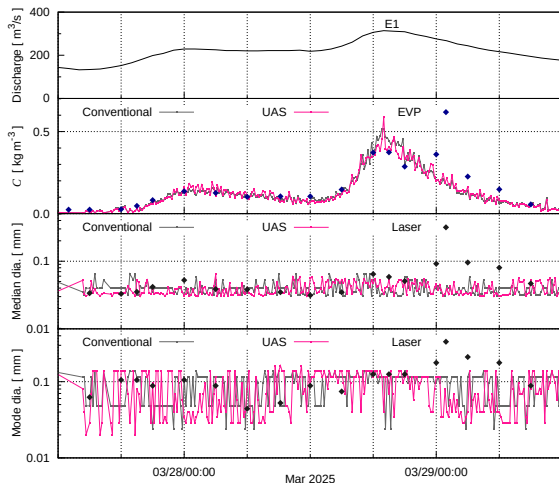
テーションによる減衰係数、 $\alpha_{\text{sta}}(f_i)$ は減衰係数の現地補正係数。 $\phi (= C/\rho_2)$ は土粒子の固液体積分率、 C は濃度 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]、 ρ_2 は土粒子の密度 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]。 $K(f_i, d_j)$ は周波数 f_i 、粒径 d_j の粒子の減衰係数でカーネル行列 [3, 7] と呼ばれている。 m は粒径階級の総数 ($m = 58$)。

(2) 機器較正

機器較正で決定した MB 減衰特性図を以下に示す。



(3) 測定値の検証



- ▶ 出水規模は平年並 (融雪期)
- ▶ 測定値 (UAS) は周期の短い変動があるが、全般的に濃度と平均粒径の測定値はサンプルの分析結果とほぼ一致
- ▶ モード径は $0.02 \sim 0.04 \text{ mm}$ と $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$.
- ▶ ピーク付近の濃度、平均粒径およびモード径の各測定値は従来手法^a(Conventional)よりサンプルの分析結果と一致. 測定精度が改善.
- ▶ 3月29日0, 3, 6時のサンプルの分析結果はいずれも測定値に比較して過大. サンプルの採取方法に問題.

^aサンプルの粒度分布をモデルとして適用

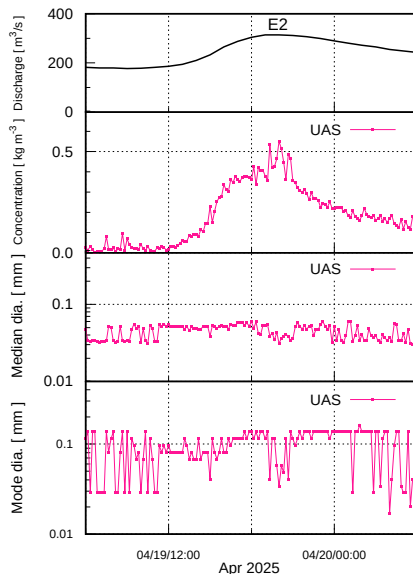
5. 考察

(1) PSD モデルの要件

- ▶ 第一に各粒径階級の**体積比率を正確に表現**できること.
- ▶ 第二に粒度分布の変化に対応できる**相当数のモデル**が必要
- ▶ 従来の方法 [6] ではサンプルの分析結果をモデルとして採用. このモデルは正確さは備えているが, モデル数は限られる.
- ▶ **本研究の PSD モデルは二つの要件を満たす.**
- ▶ この結果, 平均粒径の測定値は 0.03~0.07 mm の範囲に幅広く分布しており, 従来の方法に比較して測定精度は大きく改善.
モード径は二極化しておりサンプルのモード径の特徴を十分再現している.
加えて濃度の測定精度の改善にも有用

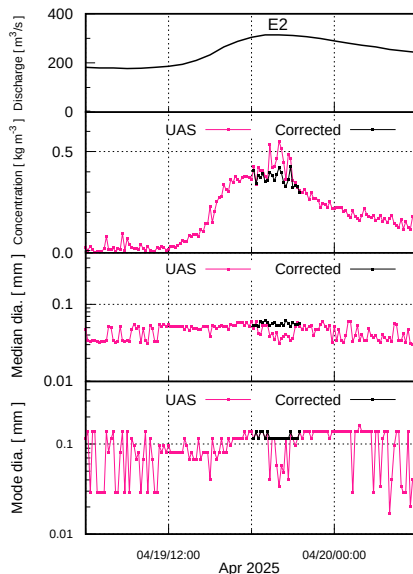
(2) 有機物の影響と測定値の補正

- ▶ 流量のピーク時に
濃度が急激に増加、
平均粒径とモード径が大きく低下
- ▶ 流水中の有機物の影響と考えられる。
- ▶ 補正対象期間の前後の測定値
 - $0.05 \text{ mm} \leq$ 平均粒径
 - $0.1 \text{ mm} \leq$ モード径
- ▶ 上記の条件を付加した PSD モデル
(約 3,700) で測定値を補正
- ▶ 濃度も自動的に補正



(2) 有機物の影響と測定値の補正

- ▶ 流量のピーク時に
濃度が急激に増加,
平均粒径とモード径が大きく低下
- ▶ 流水中の有機物の影響と考えられる.
- ▶ 補正対象期間の前後の測定値
 - $0.05 \text{ mm} \leq$ 平均粒径
 - $0.1 \text{ mm} \leq$ モード径
- ▶ 上記の条件を付加した PSD モデル
(約 3,700) で測定値を補正
- ▶ 濃度も自動的に補正



(3) 粒度分布測定 of 課題

- ▶ 各測定値には**周期の短い不規則な変動**が見られ、測定値の信頼度を大きく低下させている.
- ▶ これは式 (5) に含まれる超音波減衰スペクトル計の測定値 $A(f_i)$ の周期の短い変動による.
- ▶ スペクトル計の**測定インターバルの短縮**と**ローパスフィルターの実装**が必要である.

6. 結論

本研究で得られた主な知見は以下のとおり。

- 1) 浮遊砂は粒径の異なる複数の土粒子の粒径集団の集合体．その粒度分布は多峰性対数正規分布モデルで表すことができる．
- 2) 多峰性対数正規分布モデルの導入によって超音波減衰スペクトル計の濃度と粒度分布の測定精度を改善することができる．
- 3) 流水中に含まれる有機物は超音波減衰スペクトル計の測定値に影響を与えるが、粒度分布モデルの平均粒径とモード径に一定の条件を付加することによって粒度分布だけでなく濃度の測定値も補正できる．

測定精度の向上には測定インターバルの短縮とローパスフィルタの実装等が今後の課題．

参考文献

- [1] LISST-SL2, Streamlined Isokinetic Sediment Flux Sensor. <https://www.sequoiasci.com/product/lisst-sl/>, (cited 2026-06-07)
- [2] 古川仁志: 超音波による河川濁水の浮遊砂濃度と粒度分布の現地計測に関する研究. 日本大学, 博士論文 (2017)
- [3] 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計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). **74**, 1.847-1.852 (2018)
- [4] 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). **74**, 1.817-1.822 (2018)
- [5] 古川仁志, 栞原昭夫, 安藤悠, 朝岡良浩: 改良型 FC を用いた超音波減衰スペクトル計による融雪出水期の土砂輸送量の測定. 土木学会論文集. **80**, 23-16022 (2024)
- [6] 古川仁志, 栞原昭夫, 奥村裕史, 朝岡良浩, 長林久夫: マイクロバブルの減衰特性方程式を用いた超音波による浮遊砂濃度と粒度分布の測定法の改良. 河川技術論文集. **27** pp. 1-6 (2021)
- [7] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力: 流水中の浮遊物質の連続計測に用いる超音波減衰スペクトル法の二種類の線形理論. 河川技術論文集. **20** pp. 1-6 (2014)