

出水時における土粒子の粒度分析に関する 比較研究

A COMPARATIVE STUDY ON GRAIN SIZE ANALYSIS FOR SEDIMENT IN FLOOD FLOW

海野 仁¹・箱石 憲昭²
Hitoshi UMINO and Noriaki HAKOISHI

¹正会員 土木研究所 水工研究グループ 主任研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 土木研究所 水工研究グループ 上席研究員 (同上)

This study aims to present an appropriate method on grain size analysis for sediment in flood flow. For the execution of numerical simulation on turbidity in a reservoir, it is indispensable to decide the settling velocity of particles. The laser diffraction method has been conventionally used for the grain size analysis and settling velocity is calculated by using Stokes' formula, nevertheless, it is indicated that the settling velocity calculated by this method differs from actual settling velocity.

The authors conducted three types' grain size analysis methods and compared the results. Among three methods, the laser diffraction method showed the distribution of larger grain size. Through this study three points were concluded. (1) Settling cylinder method was regarded to give the most reliable results for the settling velocity of fine particles. (2) The centrifugal sedimentation method could be alternate the settling cylinder method. (3) In case of using laser diffraction method, super sonic distribution treatment should be added.

Key Words : grain size analysis, numerical simulation, turbidity, laser diffraction method, Stokes' formula, settling cylinder method, centrifugal sedimentation method

1. はじめに

ダム貯水池の水質問題のひとつに、濁水長期化問題があり、この対策として選択取水設備や流動制御フェンス等が用いられている。これらの施設の規模や運用方法を検討する場合は、土砂による水の濁りに関する数値シミュレーション（以下、「濁水シミュレーション」と略す。）が用いられている。シミュレーションの手法は、近年の計算機の性能向上と共に進歩しており、鉛直1次元モデル、鉛直2次元モデルなどの種々のモデルが開発されている。濁水予測を精度良く行うためには、土粒子の沈降速度をはじめ、条件設定のための観測方法ならびに分析・整理方法の改善を図ることが望まれている。

一方、行政の手続きとして、一定規模以上の新規ダム事業の実施にあたっては、環境影響評価を実施することが法律で定められている。また、調査手法を定めた省令には、「濁度またはSS及びその調査時における流量」が調査すべき情報として定められている。さらに、省令の解説書には、濁度・SSのほかにも出水時に採水され

た濁質の粒度分布を調査すること、また、必要に応じ、粒子の沈降速度を実験的に求めることが示されている¹⁾。

土粒子の沈降速度について、仲村渠らは浄水場の沈砂池に流入する濁水を対象に、レーザー回折式測定装置を用いた粒度分布を沈降速度分布に換算する手法を提案している²⁾。貯水池の濁水シミュレーションにおいても分析手法が簡便なことから、従来、仲村渠らの研究と同様に、濁水をレーザー回折法により分析し、得られた粒径分布からストークス式やルベイス式等を用いて沈降速度分布を算定する手法が用いられてきた。しかしながら、レーザー回折法による粒度分布を基に設定した沈降速度については、沈降実験により計測した沈降速度と異なる場合があり、適切な粒度分布の調査方法、条件設定方法の確立が求められている³⁾。鈴木らの貯水池底泥を試料とした研究では、長期濁水化の原因となる難沈降粒子について、ストークス式を用いて沈降や長期濁水化をシミュレートすることは非常に困難である⁴⁾と指摘している。筆者らの貯水池底泥を用いた先行研究においても、レーザー回折法による粒度分析が他の手法に比べて粗粒化した結果を示すと報告した⁵⁾。

本研究では、濁水シミュレーションの重要な条件設定の一つである土粒子の沈降速度分布の設定に必要な、土粒子の粒度分布の設定手法を提案することを目的とする。具体的には、洪水時に現地から採取した濁水を試料に沈降実験を行い、測定した沈降速度からストークス式を用いて粒度分布を算定する。これを粒度分布の最確値と捉え、簡便的な手法であるレーザー回折法ならびに透過式遠心沈降法（以下「遠心沈降法」という。）を用いて測定した粒度分布との比較検討を行い、濁水シミュレーションの与条件の一つである土粒子の粒度分布の設定手法を提案する。

2. 検討手法

筆者らの先行研究では、貯水池から底泥を採取し、模擬濁水を調製して粒度分布を比較した⁵⁾。本研究では、出水時に現地より採水した濁水を試料とし、検討を進める。試料は、2007年に川治ダム貯水池（栃木県）・下久保ダム貯水池（群馬県）において、また、2010年に利根川水系山口川（茨城県）において採水した。検討手法を以下に述べる。

(1) 粒度分布の測定法

濁水シミュレーションで用いる濁質の沈降速度分布の設定手法には、濁質の粒度分布を測定し、その結果からストークス式等により沈降速度分布を換算する方法が用いられる。粒度分布を求める手法は、分析手法が簡便なことからレーザー回折法や遠心沈降法といった測定装置を用いた方法が一般的に用いられている。一方、沈降速度の測定には、沈降筒に注入した濁水の濃度の経時変化を測定する沈降試験が用いられるが、施設の規模・測定方法は様々である。本稿では、沈降筒を用いた手法を「沈降筒法」と記述する。

本研究では、①沈降筒法、②遠心沈降法、③レーザー回折法の3種類の方法により粒度分布を測定し、結果を比較検討した。ここで、沈降筒法は、実験により計測した沈降速度にストークス式を適用し、粒度分布を換算する手法である。遠心沈降法は、遠心力により強制的に粒子を沈降させ、遠心力付加時間毎の光の通過量を計測するとともに、濃度の時間変化から沈降速度を設定し、ストークス式を用いて粒径を換算する手法である⁶⁾。レーザー回折法は、土粒子にレーザー光を照射し、土粒子からの回折光の光強度を計測した後、光強度にMie散乱理論を適用し、粒子径区分毎の粒子量を求める手法である⁷⁾。各測定方法の詳細、測定項目を表-1に示す。なお、土粒子の密度は、JIS A 1202により測定した。以下、沈降筒法による粒度分布の換算方法を記す。

表-1 粒度分布測定法と計測項目

測定方法	沈降筒法	遠心沈降法	レーザー回折法
測定計測器	沈降筒 φ200mm×L2.2m (約63%)	(株)セイシン企業製 SKC-2000	(株)島津製作所製 SALD-3000S
測定条件	室温一定(20℃)	測定範囲: 0.3 μm~50 μm	測定範囲: 0.05 μm~3000 μm
測定項目	沈降筒水位、SS、水温	粒度分布	粒度分布
測定手順	初期水深を2.0mとし、底面から0.5mの位置に採水用コックを設置し、測定回数毎に1リットルの採水を行う。	採水した試料100mlを測定装置に投入し、測定を行う。	試料濃度に応じた量(50~100ml程度)を測定装置に投入し測定を行う。
測定回数	11~13回 (充水直後、(5分後、15分後、) 1時間後、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、3日後、7日後、14日後、21日後、42日後) 山口川では、5分後、15分後についても実施。	1回	1回
汎用性	測定方法の詳細が統一されていない。	測定計器自体が少ない。	一般的によく用いられる。

○沈降筒法による粒度分布の換算方法

①水中の粒子は、経過時間 t の間に水面から採水地点までの距離 l を沈降していると考え、この時間 t に対応する平均沈降速度 $w(t)$ は(1)式で表される。

$$w(t) = \frac{l}{t} \quad (1)$$

②この時間 t の間に沈降したSSの重量比 $F(t)$ は、実験開始時点($t=0$)から t までのSSの変化量である、(2)式で表される。

$$F(t) = \frac{SS_{t=0} - SS(t)}{SS_{t=0}} \quad (2)$$

このSSの重量比 $F(t)$ は、時間順として沈降が速いほうからの累計分布として求めている（いわゆるフルイの上）ので、通常の累積分布（フルイの下）に直すのであれば、(3)式で表される。

$$F(t) = \frac{SS(t)}{SS_{t=0}} \quad (3)$$

③粒子形状が球形であること、単一粒子の沈降とみなせること、および粒子レイノルズ数($Re = d \cdot w_s / \nu$)が1よりも小さいという条件が成り立つ場合、粒子の沈降速度と粒径は、ストークスの沈降速度式により相互に換算することができる。

$$w_s = \frac{d^2 g (\rho_s - \rho_w)}{18\mu} \quad (4)$$

ここに、 w_s ：粒子の沈降速度、 d ：粒径、 g ：重力加速度、 ρ_s ：粒子密度、 ρ_w ：水(媒質)の密度、 μ ：水の粘性係数である。粒径 d は、ストークス則をベースにSSの減少率から換算していることから、ストークス径とも呼ばれている。沈降筒法では、濁水を沈降筒内の水位が200cmとなるまで注水し、表-1に示される測定時間毎に沈降筒水位、水温、SSの計測を行った。

(3) 沈降速度の設定法

濁水シミュレーションで用いる濁質の沈降速度の設定手法は、前述の通り、濁質の粒度分布にストークス式を適用して沈降速度分布を換算する方法が用いられる。具体的には、遠心沈降法、レーザー回折法等を用いて計測した粒度分布について、粒径区分を数段階設定し、各粒径区分のSS占有率と代表粒径を設定する。次に、各代表粒径に対応する沈降速度を(4)式を用いて算定し、沈降速度別の占有率を求め、沈降速度分布を求める。沈降筒法では沈降速度分布を計測することから、遠心沈降法、レーザー回折法に比べ、最も適した沈降速度分布を与えられると考えられる。以下、議論を容易にする観点から、沈降速度分布に代えて粒度部分布の比較について検討を進める。

(4) 前処理の影響

濁水中に含まれる濁質粒子の土コロイドは、粒子に作用する外場の影響を受けて運動する。この運動により粒子が衝突を起こし、粒子間に強い引力が作用していれば凝集し、フロックを形成するといわれている⁸⁾。フロックが形成されたまま測定を行うと、粒度分布が粗粒化傾向に見積もられ、沈降速度が過大に評価されることから、ここでは前処理として濁質の分散について検討する。

濁質の分散方法は、分散剤等の薬液を注入する方法や超音波振動を与える方法が考えられる。分散剤は、多種に亘り存在し、ダムの底泥の組成により最適な分散剤の種類、注入量を決定することは非常に困難である。そこで、様々な底泥の分散手法として適用が可能と考えられる超音波振動による分散の効果について検討した。分散処理は、②遠心沈降法、③レーザー回折法を用いた分析の一部のケースに導入し、分散処理には、東京硝子器械(株)製の超音波洗浄器FU-10Cを使用した。処理手順は、ビーカーに入れた濁水1Lに対し、出力60w/発振周波数28kHzの超音波振動を所定の時間加える方法とした。表-2に濁水土粒子の分散方法を示す。

(5) 採水地点別の具体的手順

a) 川治ダム・下久保ダムにおける検討

洪水時に川治ダムおよび下久保ダムにおいて貯水池に流入する濁水を採水した(表-3)。川治ダムから採水した試料は、SS=1,160[mg/L]と高濃度である。一方、下久保ダムから採水した試料は、SS=42[mg/L]と比較

表-2 濁水土粒子の分散

測定方法	分散方法	
	分散なし	分散あり
遠心沈降法	分散材:無添加	分散材:無添加
	分散方法:手攪拌	分散方法:超音波振動10分間(60w)
レーザー回折法	分散材:無添加	分散材:無添加
	分散方法:手攪拌	分散方法:超音波振動10分間(60w)

表-3 実験に使用した濁水(川治ダム・下久保ダム)

	濁水1	濁水2
ダム名	川治ダム	下久保ダム
採水地点	貯水池末端	貯水池末端
種別	貯水池流入水	貯水池流入水
採水日	2007.9.7	2007.10.1
SS[mg/L]	1,160	42

表-4 実験ケース(川治ダム・下久保ダム)

ケース	濁水	分析方法	分散処理	結果
1	川治ダム流入水	沈降筒法	なし	図-3 図-4
2	川治ダム流入水	遠心沈降法	なし	図-3
3	川治ダム流入水	遠心沈降法	あり	図-3
4	川治ダム流入水	レーザー回折法	なし	図-4
5	川治ダム流入水	レーザー回折法	あり	図-4
6	下久保ダム流入水	沈降筒法	なし	図-5 図-6
7	下久保ダム流入水	遠心沈降法	なし	図-5
8	下久保ダム流入水	遠心沈降法	あり	図-5
9	下久保ダム流入水	レーザー回折法	なし	図-6
10	下久保ダム流入水	レーザー回折法	あり	図-6

的低濃度である。

粒度分布の分析方法は、前述の3手法とし、一部については分散処理を行い、結果を比較検討した。また、電子顕微鏡を用いた粒子の形状観察を併せて実施し、分析手法により差異の生じる原因について考察した。土粒子の分散処理の方法を表-3に、実験ケースの一覧を表-4に示す。

b) 山口川における検討

検討に先立ち、利根川水系山口川(茨城県桜川市真壁町)において洪水時に河川水を採水した。採水は、洪水のピーク時から減水時にかけて4回おこなった。各試料の採水時刻および濁度・SSの測定結果を、表-5に、採水地点近傍の雨量観測所のデータを図-1に、採水地点の流量データを図-2に示す。これらの試料を用い、①沈降筒法、②遠心沈降法及び③レーザー回折法による粒度分布の比較検討をおこなった。

実験方法は、基本的に「a) 川治ダム・下久保ダムにおける検討」と同様としたが、 20μ を超える大きな粒径の範囲の粒度分布が求められるよう、沈降筒法に充水後5分、15分の採水・分析を追加した。

表-5 実験に使用した濁水（山口川）

試料No.	採水日	採水時刻	分析時 濁度 [NTU]	分析時 SS [mg/L]
1	2010.9.16	10:55	787	944
2	2010.9.16	11:25	432	466
3	2010.9.16	12:35	143	189
4	2010.9.16	13:50	59	93

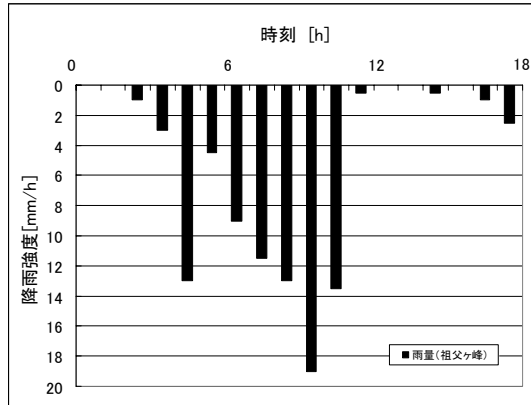


図-1 採水日の降雨強度（祖父ヶ峰観測所）

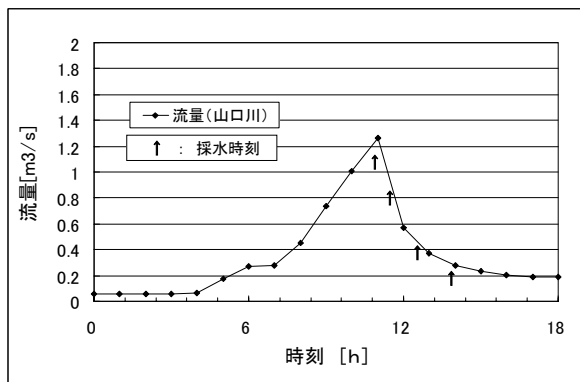


図-2 採水日の流量（山口川流量観測所）

なお、遠心沈降法、レーザー回折法の一部のケースについては、分散処理を行った。分散方法についても、「a) 川治ダム・下久保ダムにおける検討」と同様、出力60w、分散時間10分とした。

3. 実験結果

(1) 川治ダム・下久保ダム

川治ダム流入水の実験結果を図-3～図-4に、下久保ダム流入水の実験結果を図-5～図-6に示す。川治ダム流入水について、沈降筒法と他の2手法（分散なし）の結果を比較する（図-3）。沈降筒法と遠心沈降法（分散なし）は、 $2\mu\text{m}$ 以下の小粒径の範囲で良く一致する結果となった。しかしながら、レーザー回折法（分散なし）は、 $5\mu\text{m}$ 以下の範囲で沈降筒法よりも粗粒化する結果

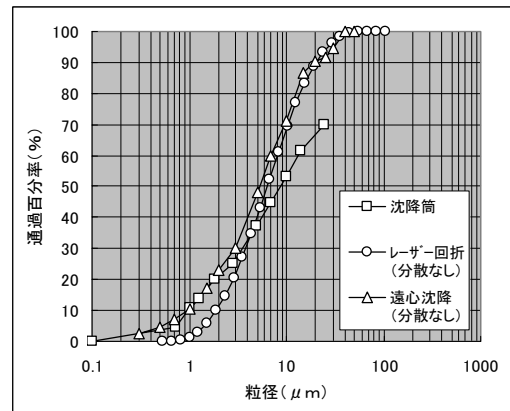


図-3 川治ダム流入水（分散なし）

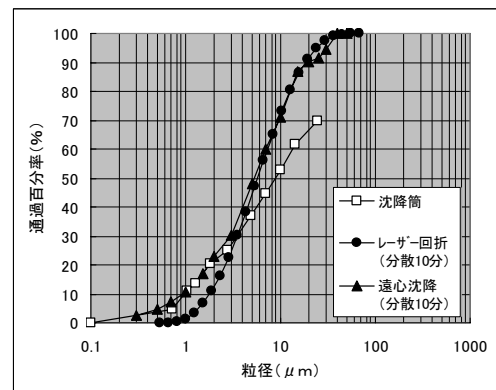


図-4 川治ダム流入水（分散あり）

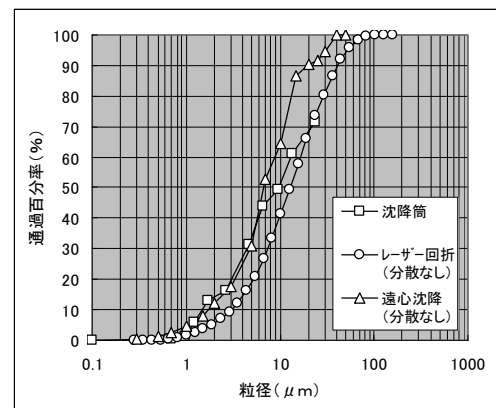


図-5 下久保ダム流入水（分散なし）

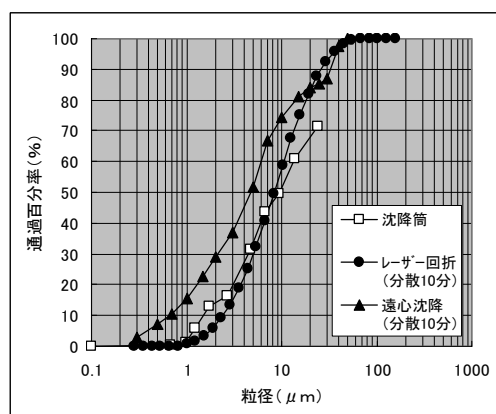


図-6 下久保ダム流入水（分散あり）

となった。

下久保ダム流入水について、沈降筒法と他の2手法を比較する(図-5～図-6)。沈降筒法と遠心沈降法(分散なし)との結果がほぼ一致する範囲は $5\mu\text{m}$ 以下となり、川治ダム流入水よりも広い範囲で、両手法の結果がほぼ一致する状況となった。しかしながら、遠心沈降法(分散あり)の結果は、沈降筒法から大きく乖離する結果となった。

ここで、分散処理の有無が粒度分布に及ぼす影響について考察する。図-3と図-4、図-5と図-6を対比すると、川治ダム流入水では分散の有無による粒度分布の差異は微少であるものの、下久保ダムでは、分散の影響が大きく現れている。特に、下久保ダムの遠心沈降法は、分散処理により細粒分がさらに細粒化し、結果として沈降筒法よりも細粒化する結果となった。

今回実験した2試料については、沈降筒法の代わりに遠心沈降法(分散なし)を用いても、細粒分の粒度分布が、ほぼ適切に求められる結果となった。しかしながら、一般に利用されているレーザー回折法は、沈降筒法に比べ、特に粒径の小さい範囲で粗粒化を示す結果となった。

次に、粒子形状の観察について述べる。川治ダム流入水の土粒子の形状を、写真-1に、下久保ダム流入水の土粒子の形状を、写真-2に示す。

川治ダム流入濁水の2000倍写真では、 $10\sim 20\mu$ の鱗片状の結晶が概ね球形に集合した粒子と、 2μ 前後の角ばった破片状の粒子が見られる。下久保ダム流入濁水の2000倍写真では、 $5\sim 10\mu$ の鱗片状の厚みのある粒子を主体とし、 7μ 前後の破片状の粒子が見られる。形状観察の結果、両貯水池に流入する濁水の土粒子は、主に鱗片状の厚みのある粒子であることが判明した。

レーザー回折法は、多様な土粒子の形状を球形状の粒子の直径に換算して粒度分布を求める手法である。このため、特に鱗片状粒子の場合、球形粒子に置き換えて沈降速度を求めると、過大な値を示すと考えられる。一方、沈降筒法は、土粒子の沈降速度を直接的に求めていることから、土粒子の形状にかかわらず、沈降速度を適切に評価できると考えられる。

(2) 山口川

採取した4検体の試料について、沈降筒法を用いて求めた粒度分布を図-7に示す。試料は洪水のピーク時から減水時にかけて採取したものであり、時間の経過に伴いSSも減少する傾向が見られた。さらに、SSの低下に伴い粒度分布も徐々に細粒化する傾向が見られた。

試料1を対象に、沈降筒法、遠心沈降法(分散なし/分散10分)およびレーザー回折法(分散なし/分散10分)の5手法により求めた粒度分布を図-8に示す。ここで、遠心沈降法(分散なし/分散10分)による測定範囲の上限は $50\mu\text{m}$ であることから、これを上回る粒径範囲については、 $45\mu\text{m}$ のふるいを通さない試料と通した

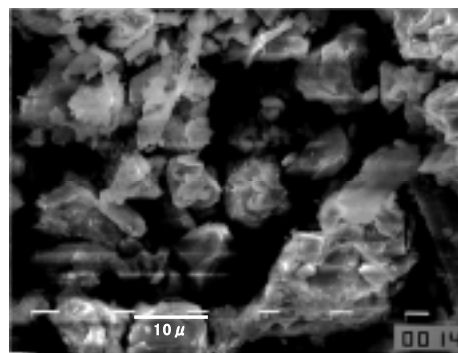


写真-1 川治ダム流入濁水 (×2000を縮小)

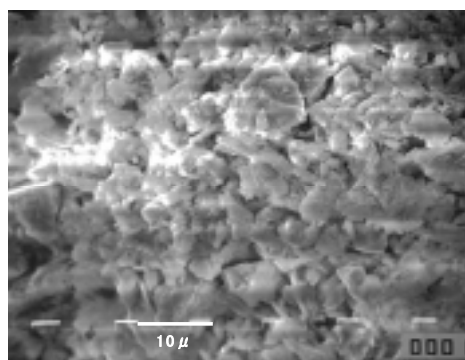


写真-2 下久保ダム流入濁水 (×2000を縮小)

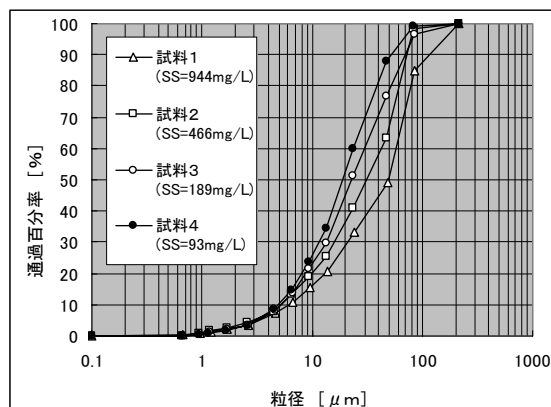


図-7 沈降筒法による粒度分布

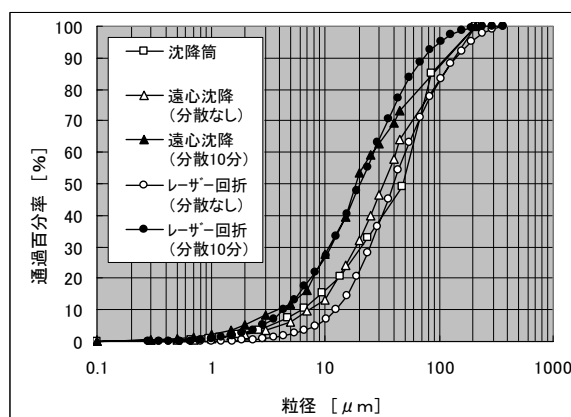


図-8 分析手法と粒度分布 (試料1)

試料とのSSの差分を求めて、粒度分布を補間した。5手法による分析結果は、類似した分布を示すものの、粒径 $30\mu\text{m}$ 以下の粒径範囲に着目すると、沈降筒法およびレーザー回折法（分散10分）が中間的な分布を示し、遠心沈降法（分散なし）、レーザー回折法（分散なし）の順に粗粒化する結果を示した。一方、遠心沈降法（分散10分）は、沈降筒法よりもさらに細粒化する結果となった。

ここで、微細粒子である粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒径範囲に着目し、分析結果を比較する（表-6）。粒径 $10\mu\text{m}$ は、1日あたり約 6.5m 沈降する粒子の粒径である（ 20°C 、 $\gamma_s=2.4$ として計算）。試料1を例に取ると、粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の占める割合は、沈降筒法では16%であるのに対し、遠心沈降法（分散なし）では13%、レーザー回折法（分散なし）では7%となり、最も普及した手法であるレーザー回折法では微細粒子の占める割合を過小評価する結果となった。

表-6には試料2～試料4の結果についても併記したが、細粒分の割合が増大するに従い、3手法による分析結果の差が広がる結果となった。原因としては、土粒子の形状が球形ではなく不均一であること、沈降速度が土粒子の濃度によっても変化することなどが考えられる。

沈降筒法は、濁質の沈降現象を把握するには最も適した方法と考えられる。濁水現象の長期化が想定される貯水池については、多くの労力は要するものの、沈降筒法により沈降速度分布を求めることが望まれる。しかしながら、十分な量の試料が確保できない場合には、遠心沈降法（分散なし）あるいはレーザー回折法（分散10分）によって粒度分布を求め、沈降速度分布を設定することも代替法として考えられる。

4. まとめ

本研究の結論について、以下のとおりまとめる。このうち、粒度分布の測定手法の特性については、以下のとおりである。

- ・沈降筒法、遠心沈降法、レーザー回折法については、従来から良く使用されているレーザー回折法による粒度分布が最も粗粒化傾向となる。
- ・粒度測定の前処理として超音波分散処理を行うと、濁質粒子が分散し、細粒化傾向となる。
- ・粒子形状が扁平である場合は、各粒度分布測定法により得られた粒度分布の差異が大きくなると考えられる。

土粒子の沈降速度の設定手法については、以下のとおりである。

- ・沈降筒法は、濁質の沈降速度を直接測定していることから、沈降現象を把握するには最も適した方法と考えられる。濁水現象の長期化が想定される貯水池

表-6 粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子の占める割合

試料No.	分析手法		
	沈降筒法	遠心沈降法 (分散なし)	レーザー回折法 (分散なし)
1	16%	13%	7%
2	20%	15%	7%
3	23%	14%	6%
4	26%	12%	6%

については、多くの労力は要するものの、沈降筒法により沈降速度分布を求めることが望まれる。

- ・しかしながら、十分な量の試料が確保できない場合には、遠心沈降法（分散なし）あるいはレーザー回折法（分散10分）が代替法となり得る。
- ・遠心沈降法を用いる場合は、濁水の分散処理は要しない。測定範囲 $50\mu\text{m}$ を上回る粒径範囲の分布については、フルイ分けを併用する。
- ・レーザー回折法を用いる場合には、超音波分散の前処理が有効と考えられるが、多くの検体を分析する場合には、その一部について沈降筒法を用いた検証が望まれる。

参考文献

- 1) 河川事業環境影響評価研究会編：ダム事業における環境影響評価の考え方，pp. 3. 106-107，（財）ダム水源地環境整備センター，2000.
- 2) 仲村渠将，吉永安俊，酒井一人：沈砂池の浮遊土砂捕捉率の試算，農業農村工学会全国大会講演要旨集，pp. 680-681，2009.
- 3) 柏井条介：ダム貯水池の水温・水質予測の一般化に向けて，河川，713号，pp. 38-44，2005.
- 4) 鈴木祥広，出口近士，関戸知雄，塩盛弘一郎，杉尾哲：宮崎県小丸川水系のダム堆積土砂に含まれる難沈降粒子の物理・化学的性状，土木学会論文集G，Vol. 65 No. 1，16-25，2009.
- 5) 海野仁・箱石憲昭：微細粒子土砂の粒度分布に関する比較検討，土木学会環境水理部会研究集会2010 in 草津，2010.
- 6) 例えば，日本ルフト（株）webページ <http://www.nihon-rufuto.com/science/pdf/D-2.pdf#search='遠心沈降'>
- 7) 例えば，（株）島津製作所webページ <http://www.shimadzu.co.jp/powder/lecture/middle/m01.html>
- 8) 例えば，農業土木学会誌No. 66(1)，1998～No. 68(6)，2000に連続掲載された，土のコロイド現象の基礎と応用に関する講座。

(2011. 5. 19受付)