貯水池の濁質粒度分析手法に関する検討 ANALYSIS METHOD OF GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF FINE SUSPENDED SEDIMENT IN DAM RESERVOIRS

梅田 信¹・盛谷明弘² Makoto UMEDA and Akihiro MORITANI

¹正会員 博士(工学) 東北大学・准教授 大学院工学研究科(〒980-8502 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06) ²正会員 (財) ダム水源地環境整備センター・研究第二部長(〒102-0086 東京都千代田区麹町 2-14-2)

Long term persistence of high turbidity water is one of the major water quality issues in rivers with a dam reservoir. This phenomenon is influenced by the grain size of fine sediment carried by floodwater into the reservoir. In his paper, analysis methodology of grain size distributions of fine sediment is discussed to propose the most proper method. Three analysis methods —sedimentation experiment in a tall tube, laser diffraction-dispersion method and centrifugal sedimentation method— are applied to several kinds of fine sediment sampled from river water and reservoir bed and the results are compared. From the results, laser diffraction-dispersion method with preprocess of sonication is proposed as most suitable for practical analysis of fine sediment in river water.

Key Words: dam reservoir, grain size distribution, suspended sediment, settling velocity

1. 序論

ダム貯水池における濁水長期化現象は、洪水時に発生 する濁質の沈降が非常に遅いために生じる.そのため、 濁水長期化の検討には、濁質の沈降速度(または粒度組 成)を正確に把握する必要がある.近年、ダム貯水池の 濁水に係わる実務上の検討では、沈降法による分析(「沈 降実験」と称されることが多い)が多く行われている¹⁾.

粉粒体の粒度分析法は種々のものがある².しかし, 河川やダム貯水池で発生する濁質は、構成する素材が多 様(多種の粘土鉱物や有機物を含む)で物性が複雑であ ることが、測定結果にも影響しうる.これに対し、どの ような分析手法が適正な粒度(または沈降速度)を出力 するかについて、十分な知見がない.

そこで本研究では,沈降実験とその他の代表的な粒度 分析方法による分析結果の比較検討を行った.そして, 最も実用的と考えられる粒度方法とその活用の仕方につ いて提案する.

2. 濁質の粒度・沈降速度の分析手法

(1) 粒度と沈降速度

濁水長期化現象の解析・検討では、濁質の沈降速度の 方が粒度よりも本質的である.沈降速度分布の算出方法 には、つぎの2通りが大まかに挙げられる. 一つ目は、濁質の粒度組成を何らかの方法により分析 を行い、この結果に対し、ストークスの沈降速度則等を 適用して、沈降速度分布に換算する方法である.二つ目 は、室内実験で実際に濁質が沈降する速さを測定する方 法である.前者の粒度分析法については、次節以降に代 表的なものを2つ示した.後者の方法は、「沈降実験」と 呼ばれることが多いが、沈降法に分類される粒度分析方 法である.円筒中に濁水を注入し、その濁水の濃度変化 (低減)を測定して、沈降速度を調べるものである.

この二つの方法にはそれぞれ長短がある. 粒度分析は, 測定が比較的容易に行える(試料水は通常数+ ml で測 定可能.所用時間は数分から数十分程度)という長所が ある.しかし, 濁質を構成する物質の組成や形状が単純 ではないため,ストークス則等を適用した場合に, 誤差 が生じる可能性がある.一方, 沈降実験は,実際に沈降 する様子を測定していることが長所といえる.しかし, 実施に非常に手間がかかる(数+リットルの試料水が必 要.実施期間に1ヶ月以上要するなど)の短所がある.

(2) 粒度分析方法の概要

本研究で用いた2つの粒度分析方法について原理の概略を以下に示す.なお、粉粒体の代表的な粒度分析手法には、このほかに細孔電気抵抗検出法(コールター法)がある.ただし、測定に手間がかかるなどの理由により、近年では濁質の粒度分析に用いられることがほとんどな

表-1 出水時濁水の試料

採取地点名	採水日	SS[mg/L]	濁度[度]
Aダム	2002年10月2日	897	428
Bダム	2002年10月2日	654	625
Cダム支川1	2006年4月24日	247	180
	2006年5月1日	1070	652
	2006年5月11日	2490	1650
Cダム支川2	2006年5月1日	631	379
	2006年5月11日	1270	890
Dダム支川1	2006年9月5日	320	133
Dダム支川2	2006年9月5日	64	24

表-2 貯水池底質の懸濁水試料

採取地点名	SS[mg/L]	濁度[度]
Eダム	1746	1756
Fダム	1390	908
Gダム	1596	3464
Hダム	1714	2220
Iダム	1368	824

い. そのため、本研究でも採用しなかった.

a)レーザー回折・散乱法

近年の分析装置と精度の著しい向上及び測定の簡便 さから、濁質の粒度分析に最も用いられている方法であ る. 粒子にレーザーを照射すると、回折・散乱光の光強 度分布パターンが生じる. この光強度分布は、粒子の大 きさにより異なる. レーザー回折・散乱法は、この散乱 パターンから、粒径を判定し、散乱光の強度から粒子の 数を識別する方法である. 実際の粒度分布測定では、大 きさの異なる粒子が混在しており、光強度分布データは、 それぞれの粒子からの回折・散乱光の重ね合わせとなる. この光強度分布に対して、Mie 散乱理論等を用いて粒子 経区間毎の粒子量を測定する手法である.

b)遠心沈降(光透過)法

水中の粒子は、粒径に応じた速度で沈降する.この沈 降速度の分布から粒度分布を求めるのが、沈降法の原理 である.さらに、測定セルを高速で回転させて遠心力を 加えることで、沈降を速めることができる.その結果、 細粒の粒子でも沈降速度を測定する時間を短縮すること ができる.これが、遠心沈降法の考え方である.分析は、 試料水を入れた測定セル中の光透過強度(濁度)を時系 列的に測定して、濁質の濃度変化を求めている.

3. 実験方法

(1) 実験試料

実験試料には、ダム貯水池の流入河川で出水時に採取 した濁水および貯水池内の底質の懸濁水を実験試料に用 いた.試料は、表-1と表-2に挙げる4ダムの出水時濁水

表-3 出水時濁水の沈降実験諸元(A, Bダム)

沈降筒形状	高さ2.0m, 直径20cm
採水位置	1点(初期水面から1.0m)
測定項目	SS, 濁度(全時刻)粒度(開始時)
採水時刻[h]	0, 3, 6, 12, 24, 72, 168, 336, 504, 672,
	1008

表-4 出水時濁水の沈降実験諸元(C, Dダム)

沈降筒形状	高さ2.0m, 直径20cm
採水位置	3点(初期水面から0.5m, 1.0m, 1.5m)
測定項目	SS(主要時刻,上層0.5m) 濁度(全時刻,全水深) 粒度(開始時および終了時)
採水時刻[h]	0, (0.5,) 1, 6, 12, 24, 72, 120, 168, 240, 360, 480, (600, 768)

※括弧内の採水時刻は、Cダムのみ

表-5 底質懸濁水の沈降実験諸元

沈降筒形状	高さ2.0m, 直径20cm
採水位置	1点(初期水面から1.5m)
測定項目	SS, 濁度(全時刻)粒度(開始時)
採水時刻[h]	0, 1, 3, 6, 12, 24, 72, 168, 336, 504, 1008

と5 ダムの底質である.

出水時濁水は, SS が 100mg/l 未満から 2000mg/l を超 えるものまで, SS 濃度の幅がある.また, C ダムは北海 道内に位置しており, 採水を行った時期が4月下旬から 5 月上旬であるので, 融雪に伴う出水を捉えたものであ る.その他は, 夏季の台風等の降雨による出水である. 底泥はグラブ式採泥を行い, 採取した底質は撹拌してか ら実験用の懸濁水を作成した. 試料は, SS が概ね 1500 mg/l 程度になるように,底泥の含水比から必要な泥量を 概算してから清水に懸濁させて作成した.また,底質に ついては JIS A 1202 に基づいて粒子密度の分析を行った.

(2) 沈降試験方法

沈降試験の実験概要を,表-3~表-5にまとめた.実験 方法は、実務検討で多く行われている方法に準じたもの である(例えば文献¹⁾).実験に用いた沈降筒は比較的大 容量、実験開始時点での試料水容積は、高さ2.0m、直径 20cmを占める.したがって、試料水は約60リットルを 要する.このように大きな沈降筒を用いる理由の一つは、 実験目的が濁水長期化現象の解析であるので、非常に微 細で沈降の遅い成分の沈降速度をできる限り正確に測る ためである.もう一つの理由は、沈降筒内のSS等を測 定するための採水回数(累積の採水量)が多くなっても、 水面位置の変化など、筒内へ影響を小さくできるように 大容量としているためである.

濁質分析のための採水位置は、沈降筒を調達する都合

により、試料間で必ずしも統一できなかった.そこで、 AダムとBダムは中央の1水深とする一方、CダムとD ダムは、より詳細に濁質の沈降状況を把握するために、3 水深からの採水を行った(ただし分析は濁度のみ).

水温の条件は、AダムとBダムは恒温室内(20℃)で 実験を行った.その他の試料は、実験の際に恒温室を利 用できなかったが、概ね 20±3℃程度の範囲に収まるよ うに努めた.

実験期間の上限を、A ダム、B ダム及び底質の実験で は 42 日間、C ダムと D ダムは実験実施の都合からそれ ぞれ 30 日間、20 日間として実施した.しかし、途中で 濁度と SS が 1mg/l を切り測定下限以下となったので D ダム支川 2 は 10 日間で実験を打ち切った.このような理 由から、実験期間に 240 時間(10 日間)から 1008 時間 (42 日間)という幅が生じている.

(3) 粒度分析方法

本研究では、粒度分析方法としてレーザー回折・散乱 式と遠心沈降式を用いた.この両者を選択した理由は、 次のとおりである.レーザー回折・散乱式は、第2章に 述べたように、測定が容易で、現在最も普及しているか らである.遠心沈降式は、濁質の沈降速度をほぼ直接的 に測定するため、濁水長期化の解析の目的に、適してい ると予想される方法だからである.

全試料に共通して用いた粒度分析装置は、SALD-3000 ((株)島津製作所、レーザー回折・散乱式)及びSA-CP3L ((株)島津製作所、遠心沈降式)である.またこれら以 外にも、分析方法の比較対照のため、他の装置(機種) を用いた分析も実施している.ただし、実験実施の便宜 上、すべての試料に対して、機種等をそろえて実施する ことができなかった.そこで、これらを区別するために、 実験結果では、レーザー式 2 (SALD-2000J、(株)島津 製作所)、レーザー式 3 (LA-901、(株)堀場製作所)、レ ーザー式4 (SALD-3000S、(株)島津製作所)、遠心沈降 式4 (SKC-2000、(株) セイシン企業)として示した.

なお、上記の SA-CP3L を用いた遠心沈降式の分析の際、 4.0µm 以下の成分に対しては加速率 240[rpm/min]による 遠心沈降を行った.一方、それ以上の粒径成分の測定は、 自然沈降方式で行われた. この方法による測定時間は約 20 分である.測定範囲は、約 0.5µm から 60µm である.

粒度分析の前処理として,超音波洗浄機を用いた分散 処理の有無による比較も行った.この処理は,ビーカー に試料濁水を適量取り,超音波洗浄機に10分程度浸して 行うものである.また,超音波振動による前処理を行わ ない場合には,スターラー等により十分に撹拌を行って, 分析に供した.

濁質の粒度分析は,理想的には採水直後に行うことが 望ましい.というのも,採水後の保管時に,採水ビンに 沈殿している間に濁質同士が吸着してフロックを形成し, そのために粒径が過大に評価される恐れが生じるからで



ある.本研究でも、粒度分析装置を使用するための便宜 などの事情により、採水からかなり時間が経過してから の分析となった試料もあった.そのような場合、何らか の処理を施してフロックを分散させる必要があると考え られるため、超音波分散機(洗浄機)で機械的に分散す る方法について検討を行った.一方、沈降実験は、試料 水が大量のため、この前処理を行う事が難しいので、容 器を人力で振とうして撹拌したのみである.

4. 実験結果と考察

(1) 沈降実験結果の概要

図-1 に沈降実験の結果として,沈降筒内のSSの時間 変化を示す.ただし,Dダムの実験では,時系列的に測 定を行ったのが濁度のみで,SSの測定は3~4回だった ため,便宜的に濁度をSSと見なして(つまり濁度=SS と仮定して)整理を行った.Aダム~Cダムは,十分な 回数の分析が行われたのでSSを用いた.

図-1 に見られる全般的な傾向として,実験開始直後 (概ね24時間以内)にSSが急激に低下し,それ以後は 比較的ゆっくりと濃度が低下している.また,出水時の 河川濁水よりも底質の方が,細粒分(粘土成分)が多い. そのため,実験開始から一月以上経過した終了時点でも,



換算結果(採水高さ別の比較)

数十から百以上のSS濃度が維持されている.

(2) 沈降実験結果の整理

図-1 に示したような沈降試験の結果を、 粒度分析の結果と比較するため、 以下のように粒径分布に換算した.

水中の粒子は,経過時間 *t* の間に水面から採水位置ま での距離 *l* を沈降していると考えると,この時間 *t* に対 応する平均沈降速度 *w*(*t*)は,

$$w(t) = l/t \tag{1}$$

と表される。一方, 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 であるので,

$$F(t) = \left\lceil SS(0) - SS(t) \right\rceil / SS(0) \tag{2}$$

と求められる。なお、この重量比 F(t)は、沈降が速い方 (大粒径)からの累積分布として求めている(いわゆる フルイ上)ので、フルイ下の累積分布に直すのであれば、

$$F(t) = SS(t)/SS(0) \tag{3}$$

とすればよい.

また,粒子形状が球形で,粒子レイノルズ数 (Re = dw/v) が1よりも小さいという条件が成り立つ場合, 微粒子の 沈降速度 w と粒径 d は, Stokes の沈降速度式

$$w = d^2 g \left(\rho_s - \rho_w \right) / (18\mu) \tag{4}$$

により相互に換算することができる.ここに、g=重力加速度、 $\rho_s=粒子密度、\rho_w=水(媒質)の密度、\mu=水の粘性$ 係数である.この粒径 <math>dは、Stokes 則仮定して換算して いることから、Stokes 径と呼ばれる.以後の検討では、 このStokes 径を他の方法による粒度分析結果と比較する. なおデータ整理の際、 $E\sim I$ ダムの底質は ρ_s を測定してあ るので、それぞれの実測値(平均値は 2.7g/cm³)を用いた. ダムで実測した堆積濁質の密度(2.5 g/cm³)を用いた.

(3) 沈降試験時の採水位置

沈降試験を行う際に,沈降筒の複数の高さから採水することがしばしば行われている.その場合,上中下と3点を設定することが多い.本検討で対象としたCダムと







比較(左列:前処理あり、右列:前処理なし. 沈降実験 は前処理なしに相当するが両者に表示)

Dダムでも、3カ所の採水を行っている.(ただし、3カ 所で分布を測定したのは両ダムとも濁度である)

Dダムの3点から採水したデータについて整理した結 果を図-2に示す.当然ではあるが,層ごとに結果のばら つきは、それほど大きくない.また、測定可能な粒径範 囲が、上下の採取位置で異なっている.(上層:0.6~ 12.9µm、下層:1.1~22.5µm)しかし、本検討のような採 水深の取り方では、特に大粒径側について、必ずしも十 分な粒径範囲が確保されているとは言えない.そのため、 多層の測定は、粒径に対する測定範囲を広げるという観 点からの、実用上の必要性は低いと考えられる.ただし、 採水や分析時に生じた誤差により、図-2 でややばらつき が見られる.そこで、平均化してより妥当な結果を得る ために水深別の採水を行うという意味はあり得る.

(4) 粒度分析方法の比較



験は前処理なしに相当するが両者に表示)

本検討では、濁質の沈降速度分布を求める観点から遠 心沈降式を選定し、測定の簡便さなど実用的な利点から レーザー回折・散乱式を粒度分析方法として選定して検 討を行った. 粒度分析結果を比較したのが、図-3~図-6 である(Cダムは紙数の制約上,5/11 試料のみを示した). 図中の線種で分析方法を区別している.また、図-3~図 -6 で左右2列のうち、左列は超音波分散による前処理を 行った試料、右列は前処理を行わなかった試料の分析結 果である.

まず前処理を施した試料の分析結果に着目する. この 場合は、2 つの測定方法(レーザー回折・散乱式と遠心 沈降式)で、ほとんどの試料について大きな差は見られ ない.理由の一つには、対象試料の粒度が細かいため、 遠心沈降式の測定範囲の上限(60µm以下)で概ね収ま っていることもあると考えられる. 逆に比較的差が大き い A ダム、D ダム、I ダムは、60µm を超える成分が 10 ~20%程度ある. この成分により、両者の差が生じてい ると考えられる. したがって、遠心沈降式を用いる場合 には、粗粒分の扱いに注意が必要である.

なお対象試料のうち,貯水池底泥に対する沈降試験結 果は、1µm程度以下の細粒(コロイド)成分が特に多い というやや特殊なものがある(例えばGダム).底泥は、 流入濁質の直接のものではないため、本検討の評価対象 としてはやや特異なものである.したがって、このよう な沈降試験と粒度分析の間での誤差の出方に対する評価 はやや難しい.

(5) 前処理の有無

本検討で対象とした試験結果では、超音波分散による



果比較(左列:前処理あり,右列:前処理なし.)

前処理の有無により、あまり大きな差が生じなかった. したがって、この結果からは、スターラーによる撹拌の みで、沈降試験といい対応となる分析結果が得られる可 能性が高い.しかしながら、いくつかのサンプルでは前 処理なしの場合に、過大評価となる結果を出すこともあ る (D ダム支川 2, F ダム, G ダムの「レーザー式」な ど). つまり, 超音波分散の前処理を実施した方が, 安定 的に測定ができる可能性が高いと考えられる.

(6) レーザー回折・散乱式と沈降実験の比較

ここまでの議論から,超音波分散による前処理を施し たレーザー回折・散乱式の粒度分析が,沈降実験の結果 と対比した場合に,比較的安定して近い結果を出すこと が分かった.そこで,レーザー回折・散乱式と沈降実験 の結果を比較するため,**表**-6 に指標値として 50%粒径 D_{50} 及び均等係数 U_c (D_{60}/D_{10})をまとめて示した.なお, カッコで示した値は,沈降実験の測定範囲を超えている ので, D_{60} または D_{10} を外挿して求めたものである.また, 最下段にはそれぞれの平均値を示した.この結果による と,レーザー回折・散乱式の方が,やや大粒径で均質な 分布を出力すると言える.これは,図-7の左図 (10%粒 径)に見られるように,細粒分の比率が小さいためであ る.一方,50%粒径になると,多少のばらつきがあるも のの,平均的には概ね近い値となっている.

ところで、このように出力された粒径が、濁水長期化 の解析においてどの程度の誤差をもたらすのかというこ とが、実は問題である.シミュレーションでは、計算条 件として粒度または沈降速度の分布をどのように与える かにも依るため、一概に論じることが難しい. 堀田ら 1) は、沈降実験と規模の異なる複数の出水における粒度分 析結果を組み合わせて与える方法を推奨している. この ように実際の出水時には、出水の規模や流量の変化に応 じ粒度組成も変化している. 七ヶ宿ダムの実測結果 ³で は、1 出水中でD₅₀が10µm程度(おおよそ10µm~30µm) も変化している. また, 秋田県のダムにおける出水 4で も、時間経過(流量変化)とともに、粒径分布の変化し ており、D50は七ヶ宿ダムと同程度の変化だが、分布と してはおよそ 20µm 以下の成分で変化が大きい. これら のことから、沈降実験とレーザー回折・散乱式の粒度分 析の結果の差は、出水時の粒度変化に比べると小さいと 評価できるものである.

5. 結論

ダム貯水池で生じる濁質の粒度分析方法について検討 した.主要な結論は次の通りである.

- レーザー回折・散乱式の粒度分析を実施する際に,前 処理として超音波分散を行うと,比較的安定した分析 結果が得られる.
- 2)実務上多く行われる沈降実験で得られる粒度分布と レーザー回折・散乱式による粒度分析結果では、大き な差が生じないことが多い.ただし、レーザー式の方 がやや過大評価する場合がある.

以上から,出水時濁水の粒度分析方法として,超音波 分散処理を施した上でのレーザー回折・散乱式による粒 度分析がもっとも実用的と,本論文では結論づける.さ

表-6 粒度分布の指標

		レーザー式		沈降実験	
ダム名	試料区分	(分散有)			
		D ₅₀	U _C	D ₅₀	U _C
Aダム	出水	17.5	10.0	_	_
Bダム	出水	4.2	5.3	3.9	5.8
Cダム	支川1 (0424)	5.9	8.0	7.7	14.1
	支川1 (0501)	8.5	10.5	11.2	12.8
	支川1 (0511)	7.6	9.7	6.4	9.9
	支川2(0501)	8.1	9.2	7.2	9.7
	支川2(0511)	6.6	8.5	5.9	8.5
Dダム	支川1(0905)	11.2	5.6	16.4	(12.0)
	支川2(0905)	16.4	5.7	16.1	(11.5)
Eダム	底質	9.1	8.1	7.7	12.3
Fダム	底質	16.1	8.1	13.2	(11.3)
Gダム	底質	2.6	4.1	1.0	(5.0)
Hダム	底質	5.9	6.9	7.5	17.7
Iダム	底質	16.1	7.3	15.1	(13.5)
平均值*		9.1	7.5	8.4	11.1

*沈降実験で値の得られなかったAダムを除いて算出



らに、分析が容易なレーザー回折・散乱法によって、(一 つの)出水中に多数の試料を採水分析して、多くのデー タを取得し、例えば粒度の時間変化を把握することが、 出水時に発生する濁水の実態を把握するために有用だと 考えられる.

謝辞:国土交通省および独立行政法人土木研究所の関係 各位には、試料やデータの提供の便宜を図って頂いた. また、東京工業大学の石川忠晴教授には、粒度分析装置 を使用させて頂いた.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 堀田哲夫,東海林光,山下芳浩,陳飛勇:貯水池濁水予測に おける濁質粒径の取り扱いに関する一考察,水工学論文集, 第49巻, pp.1123-1128,2005.
- 2) 椿淳一郎, 早川修:現場で役立つ粒子径計測技術, 日刊工業 新聞社, 2001.
- 3) 横山勝英: 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp. 93-98, 2002.
- 4) 梅田 信, 富岡誠司:ダム貯水池における洪水時微細土砂の 流下過程について,河川技術論文集, 第9巻, pp.359-364, 2003.

(2007.9.30 受付)