

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

A STUDY ON TREATMENT OF SUSPENDED SEDIMENT SIZES IN TURBIDITY PHENOMENON PREDICTION

堀田哲夫¹・東海林光²・山下芳浩³・陳飛勇⁴

Tetsuo HOTTA, Hikaru SHOJI, Yoshihiro YAMASHITA and FeiYong CHEN

¹正会員 博(工) (株)建設技術研究所東京本社 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町4-9-11)

²正会員 修(工) (株)建設技術研究所東京本社 河川部 (〒330-0000 さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

³正会員 学(工) (株)建設技術研究所東京本社 河川部 (〒330-0000 さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

⁴正会員 博(工) (株)建設技術研究所東京本社 河川部 (〒330-0000 さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

A lot of efforts have been made to illuminate turbidity phenomenon in dam reservoirs since 1970's, by experiments, field measurements, and numerical modeling. From practical point of view 1- or 2-dimensional models are used, because long-term prediction is required in environmental impact analysis. It is also important to predict the average water quality change after a dam is built, which means you have to be careful in giving calculation parameters that shifts the average prediction values. In this paper we suggest a method to parameterize suspended sediment sizes. First we investigated suspended sediment size changes related to river discharge. Then divided them to 4 to 5 classes by giving representative diameter to each of them, based on turbid water settling experiment. Parameters determined here had enough accuracy to represent the turbid water behaviors in dam reservoirs. This indicates that the method is useful to determine the suspended sediment characteristics in environmental impact analysis of new dam reservoirs.

Key Words: *Turbidity phenomena, size of suspended sediment, environmental impact analysis, dam reservoir*

1. はじめに

我が国における濁水長期化現象は、昭和40年代半ばから一ツ瀬ダム、飛騨川上流のダム群、新宮川のダム群、早明浦ダムなどで顕在化し始め、社会問題として認識されるようになった。

それ以来、管理の現場においては地元漁業組合、観光協会等の各主体、管理者、学識者等の連携した取り組みのもと濁水長期化現象軽減に向けた多大な努力が払われている^{1), 2)}一方、電力中央研究所、旧建設省土木研究所、大学等の各種研究機関においては室内実験³⁾、濁水実態調査・研究、現象の解明と各種予測モデルの開発^{4), 5)}が行われており、近年は現象を忠実に再現できる実用的な3次元モデルも開発されてきている。

他方、実務的には新たなダム建設が社会的に大きな関心事項となることが多いことを背景として、閣議決定に基づく環境影響評価の手続きを終了しているダム、環境影響評価法の評価対象とならない規模のダム等において

も環境影響評価法に基づく環境アセスメントと同等の予測・評価が求められており、環境レポート等として作成・公表されつつある。

また、濁水現象は下流河川での物理環境変化やダム堆砂の視点からも注目されてきている。

こうしたダム建設に係る環境影響評価等においては、ダム建設後の平均的な環境変化の評価に力点を置いており、現在は10ヶ年程度の様々な流況下における予測・評価が求められている。そのため、将来的には比較的高度な3次元モデル等による長期的な予測・評価が可能となるものと期待されるが、現時点では一般に鉛直1次元あるいは1次元多層モデルが用いられている。

このように、平均的環境変化の予測が重要であることから、予測結果の平均値を変化させ得る計算条件の与え方には、十分に留意することが必要である。

本論文では、ダム建設後の濁水長期化現象予測結果に大きな影響を与え得る濁質粒径の取り扱いについて、考察を行う。

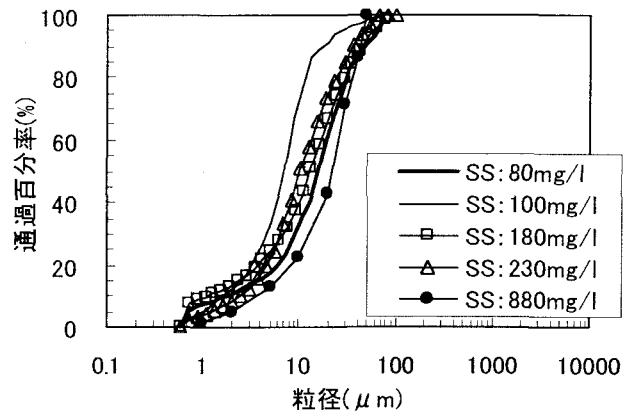
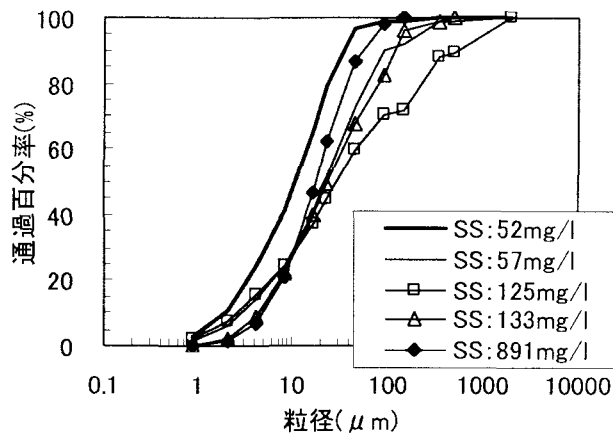


図-1 濁質の粒度組成(左:Aダム, 右:Bダム)

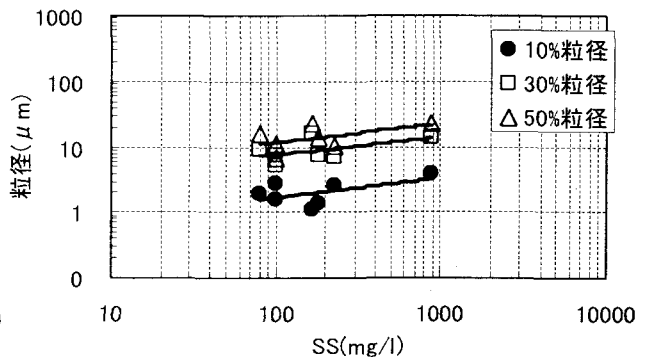
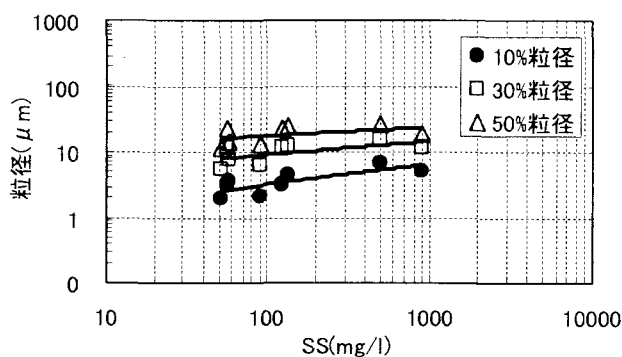


図-2 SS濃度と代表粒径の関係(左:Aダム, 右:Bダム)

2. 流入濁質の特性

貯水池濁水現象のシミュレーションにおいては、一般に、連続的に存在する濁質の粒径成分をいくつかに分割し、それぞれに代表粒径を与えることによって計算を行う⁶⁾。したがって、流入濁質の粒度分布、その分割方法、区分毎の代表粒径が濁水シミュレーション結果を支配するパラメータとなる。

図-1はAダム、Bダムにおける複数洪水での流入河川採水試料から濁質粒径を分析した結果の一例であるが、Bダムの例では $1\mu\text{m}$ 以下の粒径成分が1~10%の範囲で変化するなど、一般に得られる濁質の粒度組成データは幅を持っている。

これらのパラメータ設定に際し、既設ダムあるいは再開発ダムでは、当該ダムにおける運用開始後の貯水池内および放流濁水データがある程度得られていることが多いため、それらのデータをよりどころとすることが可能である。しかし、新規に建設されるダム貯水池においてはこうしたデータが存在しないため、濁質粒径に関する各パラメータの設定が予測結果を大きく左右することになる。

以下では、実測データをもとに上記の各パラメータ設定方法について検討を行う。

(1)濁質の粒径変化特性

河床変動計算等においては掃流力の算出結果にもとづいて粒径別の移動土砂量を推定するため、流量規模によって移動する土砂の粒度分布は変化することとなる。しかし、貯水池濁水シミュレーションにおいては、いくつかの事例^{7), 8)}を除き、流入濁質の粒度分布を一定として取り扱うことが多い。

これには、濁水現象の原因となる濁質成分がウォッシュ・ロードであるため、掃流力との関係が不明であること、降雨時の裸地からの濁質流出過程が十分に解明されていないこと、平常時の採取が可能である河床材料と異なり、濁質については洪水時の採水が必要であるため、データの収集量が比較的に少ないこと、などの原因が考えられる。

このように、濁質の粒径変化特性の一般化にはいくつかの困難が予想されるが、定性的には降雨が大きいほど裸地からの濁質生産量、河川流量ともに大きくなるものと予想され、流域毎には両者にある程度の関係をみいだすことができるものと考えられる。

そこで、AダムとBダムにおける流入河川SS濃度と10%、30%、50%粒径の関係をプロットしてみると図-2のようである。つまり、SS濃度の上昇(すなわち流量の増加)とともに10%、30%、50%粒径も大きくなっており、濁質が粗粒化する傾向がみられる。

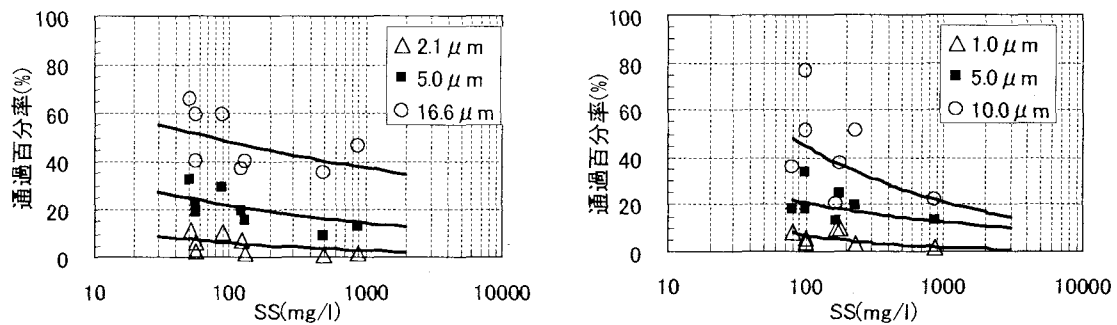


図-3 SS濃度と代表粒径の関係(左:Aダム, 右:Bダム)

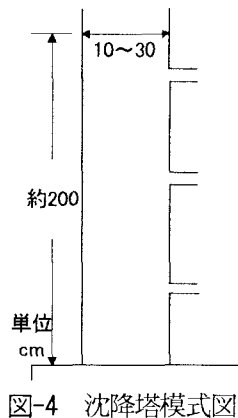


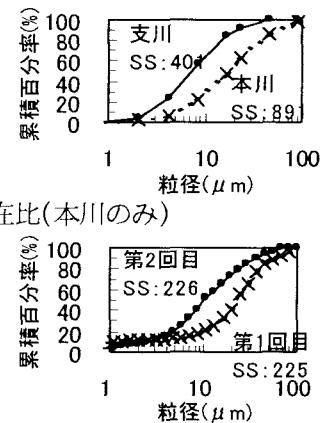
図-4 沈降塔模式図

表-1 Aダムの粒径分割, 代表粒径と存在比

粒径区分(μm)	~2.1	2.1~5.0	5.0~16.6	16.6~
代表粒径(μm)	0.6	2.1	5.0	16.6
存在比(支川)	1.3%	8.2%	37.2%	53.3%
存在比(本川)	4.9%	25.3%	54.7%	15.1%

表-2 Bダムの粒径分割, 代表粒径と存在比(本川のみ)

粒径区分(μm)	~1.0	1.0~5.0	5.0~10.0	10.0~
代表粒径(μm)	1.0	2.0	6.0	15.0
存在比(1回目)	9.8%	3.3%	7.5%	79.4%
存在比(2回目)	4.2%	20.6%	26.2%	49.0%



また, 図-3はSS濃度と各粒径の通過百分率の関係を示したものであるが, SS濃度の上昇とともに小粒径成分の割合が低下している(総量自体は増加している). つまり, 流量が大きく, SS濃度の高い状況下では河川の掃流力が大きくなるため, 大粒径成分が相対的に多くなる.

A, B各ダムの濁水現象に影響する濁質成分を仮に, それぞれ16.6μm, 10.0μm以下とすれば, それらより小さい粒径成分の割合は流量の増加とともに減少し, その減少分だけ濁水現象に影響しない粒径成分が増加したことになる.

(2) 濁質の沈降特性

濁質沈降速度の推定には, 一般にStokesの式あるいはRubeyの実験式が用いられる. しかし, 濁質を球体とみなすことは必ずしも適切ではなく, また, 濁質表面のゼータ電位による濁質の相互反発やブラウン運動等の影響も明らかになっていない.

最近では, 濁質の沈降過程に確率の概念を取り入れるといった新たな試み⁹⁾も始まっているが, 現時点では濁質の沈降特性を実験的に求め, それらをもとに濁質粒径を分割し, それぞれに代表粒径を与えることが実用的な手法であると考えられる.

a) 濁質沈降実験

本研究では, 濁質の沈降実験として以下のようなものを実施した. この方法は, 必ずしもベストの方法であるとはいえないが, 筆者らが実用的な観点から濁質の沈降

特性を把握するために20年以上前から実施してきたものである.

実験は図-4に示すような直径20cm程度, 高さ2m程度の沈降塔に洪水時に採水した濁水を注水し, 濁度が一樣になるように混合してから実施する. そして, 実験開始から20日程度の間沈降塔の上・中・下層に設けられた取水コックから所定の時間間隔で採水を行い, SSあるいは濁度値から濁りの時系列的な変化を把握するものである. ちなみに, 直径20cmの沈降塔で実験を行う場合, 60リットルの濁水試料を採水する必要がある.

b) 実験結果の再現

次に, 上記の実験で得られた沈降塔内のSS濃度の変化時系列をもとに, Stokes則を仮定した濁質の沈降と分子拡散とを考慮した鉛直1次元モデルによる実験の再現計算を行い, 濁水シミュレーション上のパラメータである濁質の分割方法と区分毎の代表粒径を試行的に決定する.

ここで, 濁質粒径の分割数を決定する必要があるが, これについては4~5つに区分すれば実用上十分な精度が得られるといわれている¹⁰⁾. これは, 濁水長期化現象に寄与する濁質成分が10μm程度以下の小さな成分であり(例えば, 15μmの粒径は1日15m程度沈降する), それ以下の成分を適切に表現できれば良いためであると考えられる. そこで, 本研究でも濁質を4区分することとした.

試行計算より決定した濁質の区分, 区分毎の代表粒径およびそれぞれの存在比を表-1, 表-2に示す. なお, 区分毎の存在比については, 実験開始時の粒度分布測定結

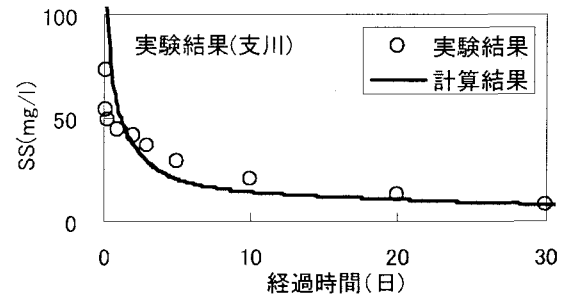
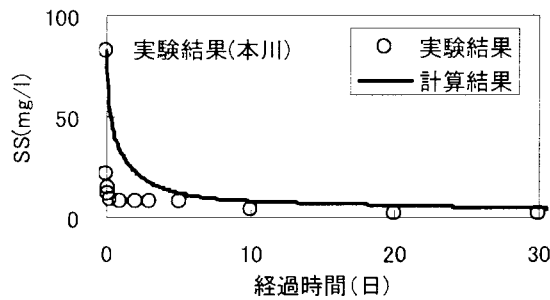


図-5 沈降実験再現結果(Aダム, 表層のみ)

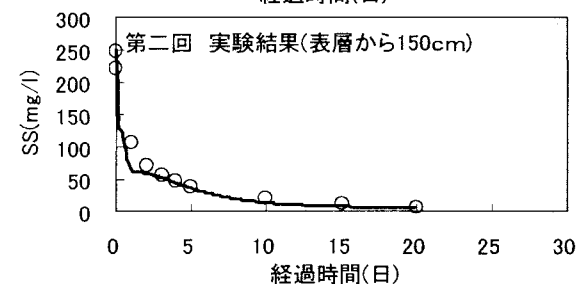
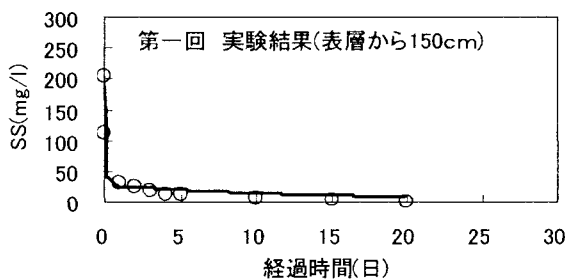
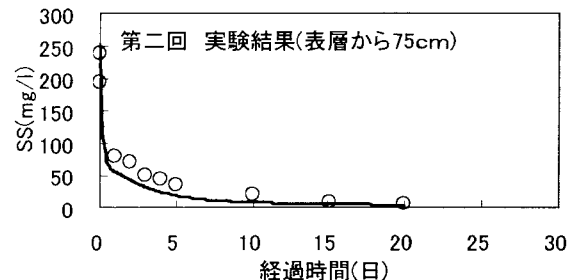
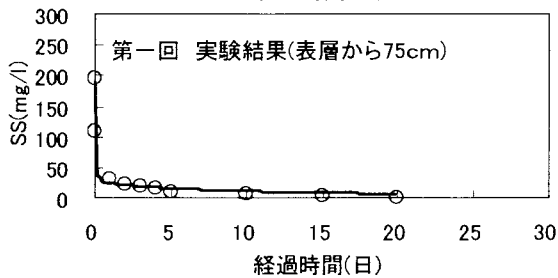
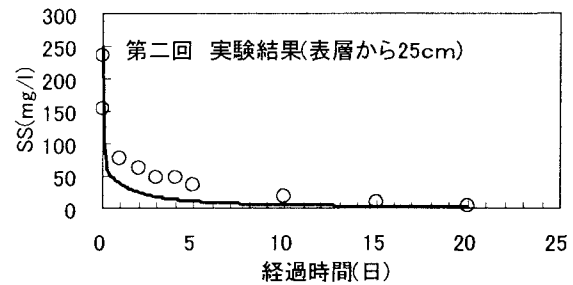
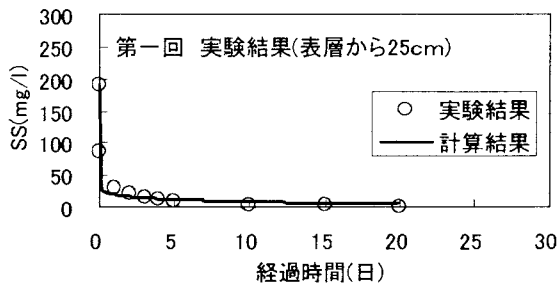


図-6 沈降実験再現結果(Bダム)

果をもとに設定した。

再現計算は図-5, 図-6のとおりである。

同一洪水のほぼ同時刻に採水されたにもかかわらず, 表-1のように本川と比較して支川の濁質が微細なAダムでは, 本川の20日後の沈降塔内SS濃度が2mg/lであるのに対し, 支川のそれは13mg/lとなっている(ゼータ電位はそれぞれ-20mVと-34mV)。

3. 現地への適用

ここでは, 新規ダムでの環境影響評価への適用を目的として, 2で示した濁質パラメータ決定方法の現地への適用性について検討を行う。つまり, 濁質の粒径分割および区分毎の代表粒径については, 2(2)に示した濁質沈降実験結果を再現し得るよう決定する。そして, 濁質の組成については, 2(1)のように流入SS濃度と関連づけた。

(1) モデルの概要

計算に用いるモデルは, 松尾ら¹¹⁾が開発した貯水池水理・水質モデルを参考に構築したものであり, 鉛直2次元の運動方程式, 熱量保存, 濁質保存式から構成されている。基礎方程式は以下のようなものである。

$$\frac{\partial uB}{\partial t} + u \frac{\partial uB}{\partial x} + v \frac{\partial uB}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_x B \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y B \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho g \quad (2)$$

$$\frac{\partial (Bu)}{\partial x} + \frac{\partial (Bv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial TB}{\partial t} + u \frac{\partial TB}{\partial x} + v \frac{\partial TB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x B \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y B \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{HB}{\rho C_w} \quad (4)$$

$$\frac{\partial cB}{\partial t} + u \frac{\partial cB}{\partial x} + v \frac{\partial cB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x B \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y B \frac{\partial c}{\partial y}) + w_0 \frac{\partial (Bc)}{\partial y} \quad (5)$$

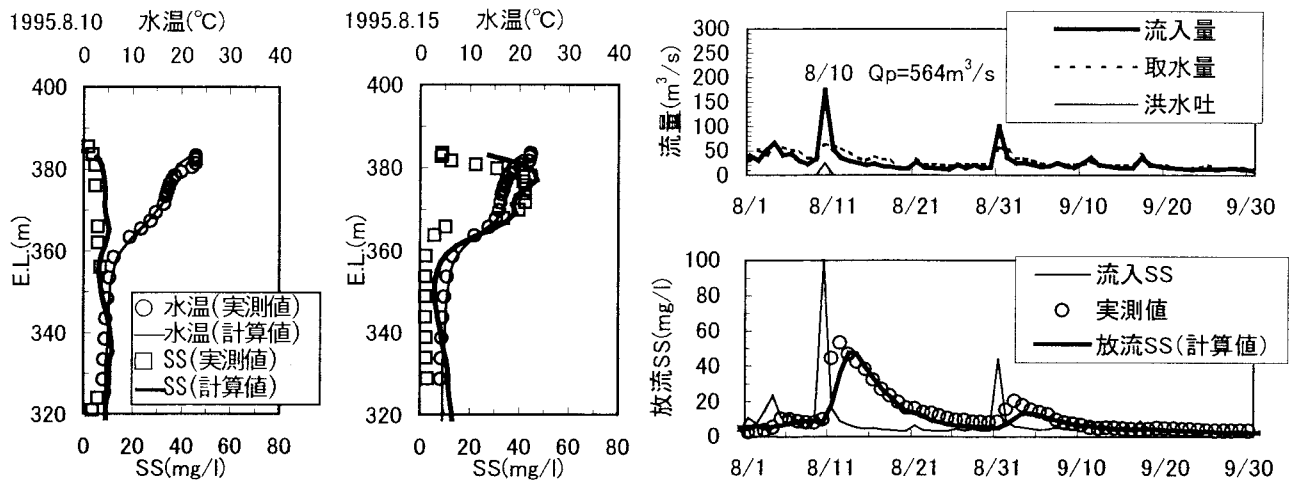


図-7 濁水現象再現結果(Aダム)

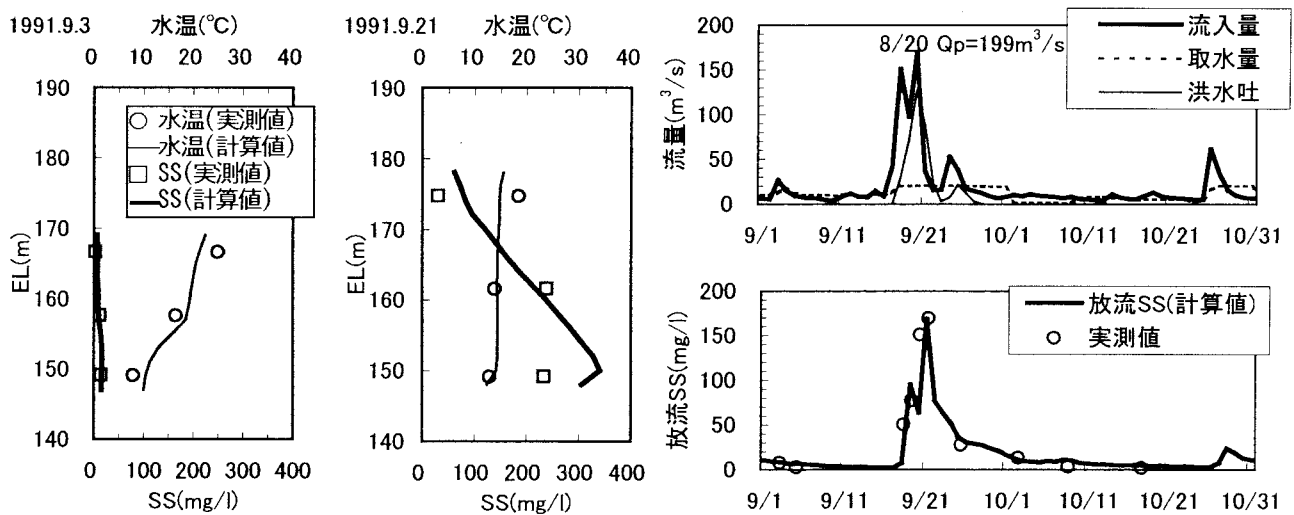


図-8 濁水現象再現結果(Bダム)

ここに、 x , y は流下及び鉛直方向の座標、 B は貯水池横断幅、 u , v は、 x , y 方向の流速、 T は水温、 H は潜熱・顕熱及び長波・短波放射による熱フラックス、 C_w は水の比熱、 C は濁質濃度、 w_0 は濁質沈降速度、 A_x , A_y は、 x , y 方向の渦動粘性係数、 D_x , D_y は、 x , y 方向の拡散係数である。

(2)現象再現計算

Aダムは、常時満水位容量約10,000万 m^3 /s、年回転率約8回の成層型ダムである。

一方、Bダムは、常時満水位容量約3,000万 m^3 /s、年回転率約15回のいわゆる中間型のダムであり強固な水温成層は形成されない。

両ダムの再現計算結果を図-7、図-8に示す。これらの結果から、濁質のパラメータは、沈降塔内という貯水池スケールと大きく異なる条件下の実験で決定したものであるが、貯水池内濁水現象を良好に再現できていることがわかる。

つまり、濁質沈降特性に関するパラメータを設定する根拠に乏しい新規ダムの予測・評価においては、図-3に示したようなSS濃度による濁質組成変化特性を把握し、濁水沈降実験を行って濁質の分割とそれぞれの代表粒径を設定することで概ね適切な予測が実施できるものと考えられる。

4. 濁質粒度組成が予測結果に与える影響

ここでは、Aダムを対象とした検証計算での洪水波形、それを2倍あるいは、0.5倍した洪水波形を用いて粒度分布が予測結果に与える影響について考察する。

濁質粒径の条件には、流量規模毎の粒径変化を考慮したもの(図-9中の粒径変化)、測定粒径のうち最も粗い粒径を用いたもの(図-9中の最大粒径)、同様に最も細かい粒径を用いたもの(図-9中の最小粒径)の3ケースとした。粒径分割は、表-1と同様である。

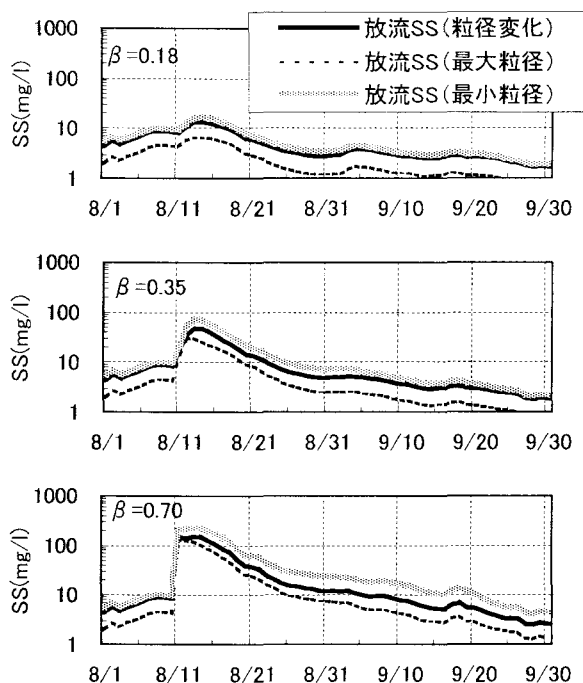


図-9 粒度分布が濁水現象予測結果に与える影響
(上: $\beta=0.18$, $\beta=0.35$, $\beta=0.70$)

放流SS濃度の予測結果は図-9の通りであり、小規模洪水(洪水時交換率: $\beta=0.18$)では、粒径変化を考慮したケースと最小粒径を採用したケースが近い結果となっている一方、最大粒径を採用したケースでは、放流水がほとんど濁水化していない。

大規模洪水では、粒径変化を考慮したケースと最大粒径採用ケースが近い結果となっているが、最小粒径採用ケースでは濁水が著しく長期化する結果となっており、仮に環境基準であるSS: 25mg/lを濁水化の基準とすれば、最小粒径を採用したケースの濁水長期化日数は19日であり、他のケース(粒径変化を考慮したケース: 12日, 最大粒径を採用したケース: 10日)の2倍程度となっている。

このように、最大粒径を用いた場合(大規模出水時の採水分析データをもとに予測を行う場合に相当)には、大規模洪水時の濁水現象を適切に予測できるものと考えられるが、中小洪水の影響を過小評価する可能性がある。一方、最小粒径を用いた場合(小規模出水時の採水分析データをもとに予測を行う場合に相当)には、大規模洪水を過大評価するおそれがある。

また、大規模洪水時の濁質補足率は粒径変化ケース、最大粒径ケース、最小粒径ケースのそれぞれについて71%, 77%, 56%であり、ウォッシュ・ロードが支配的なダムの堆砂予測においては注意を要する。

このように、ここで示した計算例は一洪水での結果であるが、平均的な評価はこれらが足し合わされた結果として求まるものであることから、新規ダムにおける環境影響予測を実施するにあたっては、調査対象を大規模洪水のみとせず、幅広い出水規模でのデータを収集することが重要であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、貯水池濁水現象の予測における濁質粒径の取り扱い方法について提案を行った。本論文の結論は以下の通りである。

- 1) 濁質の粒径は流量規模に応じて変化し、その規模が小さいほど細粒分が多い傾向にある。
- 2) 濁水沈降実験をもとに粒径分割と区分毎の代表粒径を決定し、1)の特性と組み合わせて流入濁質条件を与えることで、貯水池濁水現象を適切に再現できた。この手法を用いれば、新規ダムの予測において適切な濁質沈降条件を与えることができるものと考えられる。
- 3) 情報量等の制約で濁質の粒径変化を考慮できない場合には濁水現象を過小あるいは、過大に評価するおそれがあるため、複数の流量規模で流入濁質組成に関するデータを収集することが望まれる。

本論文にはデータ不足の面も多く、特に粒径の変化については流量規模のみならず、先行降雨の有無や洪水のピーク前後といった時間的な変化も影響しているものと考えられるが、これらについては今後データを蓄積し、解明していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 野池悦雄：飛騨川水系ダム群の濁水対策について、大ダム、N0.157, pp.43-55, 1996.
- 2) 緒方芳仁, 村上正, 落合正治：一ツ瀬ダム選択取水設備の運用実績と効果について、N0.168, pp.69-80, 1980.
- 3) 福岡捷二, 福島祐介, 村田和夫, 荒井健：成層化した二次元貯水池に流入する密度流の実験的研究, 土木学会論文報告集, 第293号, pp65-77, 1980.
- 4) 安芸周一, 白砂孝夫：貯水池流動形態のシミュレーションの解析その1, 発電水力, N0.134, pp.53-66, 1975.
- 5) 森北佳昭, 天野邦彦：貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, 第182号-1, 1991.
- 6) 宮永洋一, 安芸周一：濁質粒度が貯水池濁水現象に及ぼす影響について, 土木学会論文報告集, 第296号, pp49-59, 1980.
- 7) 川北晃久, 工藤勝弘, 小林利久：粒度分布モデルによる貯水池冷濁水シミュレーション, ダム技術, N0.51, pp.43-47, 1990.
- 8) 鈴木伴征, 桜井寿之, 柏井条介：川治ダム貯水池の洪水時濁水現象, 水工学論文集, 第48巻, pp1357-1362, 2004.
- 9) 梅田信, 池上迅, 石川忠晴, 富岡誠司：ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析, 水工学論文集, 第48巻, pp1363-1368, 2004.
- 10) 桜井寿之, 柏井条介：貯水池における出水時の微細粒子の捕捉, ダム技術, N0.161, pp.38-47, 2000.
- 11) 松尾直規, 山田正人, 宗宮功：貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係, 水工学論文集, 第40巻, pp.575-581, 1996.

(2004.9.30 受付)