

洪水時のダム湖における 濁水の観測と数値シミュレーション

OBSERVATION AND NUMERICAL ANALYSIS OF TURBIDITY IN A RESERVOIR DURING FLOOD

齋藤 大作¹・清水 康行²・坊野 聡子³・伊藤 丹⁴

Daisaku SAITO, Yasuyuki SHIMIZU, Satoko BOUNO, Akashi ITO

¹正会員 工修 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究科助教授 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

³学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 北海道開発局 室蘭開発建設部 沙流川ダム建設事業所長 (〒055-01 沙流郡平取町字荷葉19-4)

It is an important subject to understand the flow and sediment transport field in reservoir management works. Continuous measurements of suspended sediment, turbidity, and velocity profiles are conducted at Nibutani Dam during a large scale flood caused by a typhoon in August of 1997. Based on the results of the observation, we carried out a numerical analysis of two dimensional model. Comparing the calculation results with field data, The turbidity, and velocity profiles are also reappeared

Key Words : reservoir, turbidity profile, field measurements.

1. はじめに

河川流域における土砂の管理は、河床変動の推定、貯水池の堆砂量の把握、河川・海域の生態系への影響把握、海域への土砂供給量の把握等、多義にわたって必要とされている。特に、流域内にダム等の貯水池が存在する場合、土砂の流下量が減少し、下流域に何らかの影響を与えることが多く、堆砂および流下土砂量の把握は重要である。中でも、洪水時には大量の土砂が供給され貯水池内に堆積する。従って、洪水時における貯水池内の土砂の流動特性を把握することにより、堆砂状況および下流への土砂供給量が把握できることとなる。

北海道日高地方に位置する一級河川沙流川流域において、1997年8月8日～14日に台風11号くずれの熱帯低気圧とこれに刺激された停滞前線により、流域平均降雨量が100mmを超える降雨が2回発生し、二風谷ダム地点でピーク流量が $1,800\text{m}^3/\text{s}$

に達する大出水が起こった。この時、大量の濁水が二風谷ダム湖内へ流入した。著者らは、この時のダム湖への濁水の流入・流出および湖内の流速とSSの鉛直分布の観測を実施し、ダム湖内の濁水の挙動を明らかにした。また、2次元数値シミュレーションにより、濁水の挙動を再現した。この結果、流速・SSの鉛直分布、ダム湖内での粒径別の土砂収支が再現できた。

2. 観測概要

(1) 二風谷ダム概要

二風谷ダムは北海道日高地方に位置し、一級河川沙流川流域の中流部(河口より約21km)に建設された多目的ダムで、1996年4月に完成し、集水面積： $1,215\text{km}^2$ 、総貯水容量： $4.58 \times 10^7\text{m}^3$ である。貯水池は縦断方向に約6km横断方向に約500mの縦に長い形状をしている。

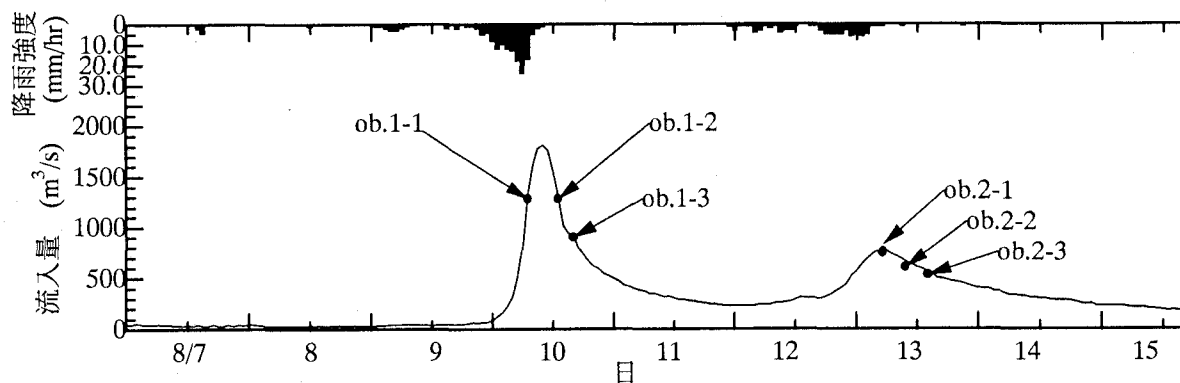


図-1 観測期間降雨量およびダム流入流量(1997 年 8 月 7～15 日)

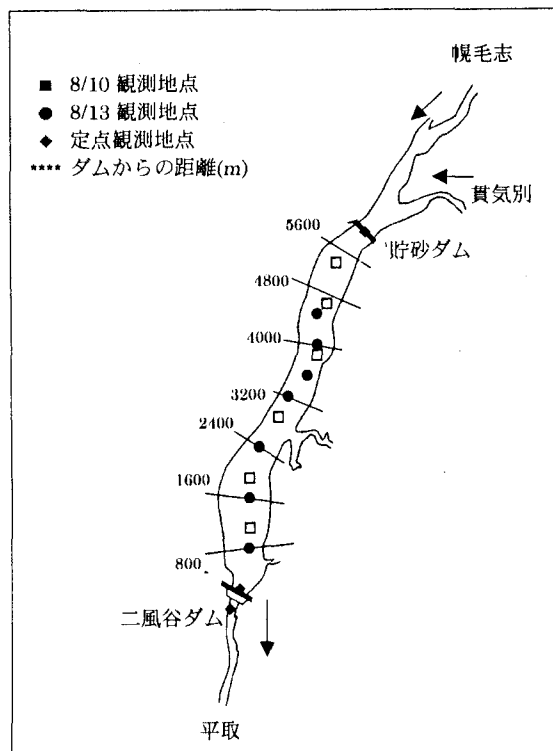


図-2 二風谷ダムおよび観測地点の概要

(2) 堆砂の粒度分布特性

1996 年 4 月のダム完成後、同年 8 月の貯水位低下時に堆砂の粒度分布調査を実施した。表-1 に粒度分布調査結果を示す。表-1 より重量百分率で 7 割以上がシルトおよび粘土で構成されており、60% 粒径 D_{60} は 0.005～0.016mm である。このことからダム湖内の堆砂の大部分が上流より供給された Washload の沈降により形成されているといえる。さらに、今回の観測により採取した浮遊土砂の粒径は 0.005～0.05mm 程度であり、表の結果と同程度のものから数倍の粒径のものまで流れてきていることが分かった。これは今回の洪水が既往最大クラスの規模であったことにより通常の洪水より大きな粒径の土砂が流下してきたと思われる。

表-1 粒度分布調査結果

採取地点 No.	1	2	3
ダムからの距離	5.2km	1.6km	0.8km
粗砂分 %	0.2	6.3	4.9
細砂分 %	18.6	18.1	6.0
シルト分 %	41.6	31.1	29.5
粘土分 %	39.6	44.5	59.6
シルト+粘土分 %	81.6	75.6	89.1
60%粒径 mm	0.016	0.012	0.005

(3) 洪水時の観測

1997 年 8 月 8 日～14 日の短期間に図-1 に示す 100mm を超える降雨が二回発生した。この際、二風谷ダム湖内へ大量の濁水が流入した。この時の流入・流出部およびダム湖内において濁水の観測を行った。観測は図-1 に示した 2 降雨による流量の各ピーク付近について 3 回の計 6 回実施した。図-2 に二風谷ダムと各観測地点の位置を示す。貯砂ダム（流入）および二風谷ダム（流出）地点については定点で流量、濁度および SS の観測を行った。また、ダム湖内については船で移動しながら流速測定及び採水を実施した。流速の測定には 3 次元電磁流速計（アレック社製）を用い、採水は MTS 式採水装置⁹⁾で鉛直方向に 3～7 地点で行った。ダム湖内で採集した濁水の分析項目は SS、濁度および光透過式粒度分析器による粒度分析とした。

(4) 観測結果

観測により、流入・流出部における流量と SS の関係、各観測地点における 10 日と 13 日の SS の鉛直分布および 13 日の流速の鉛直分布が測定できた。

図-3、4 はダム湖内の流速および SS の鉛直分布を示したものである。

流速分布は上流部では水面ほど流速が速く、下流へ行くに従って深さ方向に一様化する傾向があった。ダム湖内上流部での表面流速は最大 1.2m/s 程度で、下流での表面流速は 0.2m/s 程度であった。

SS は深い程多少大きい値を示しているが河床付近を除いて深さ方向に概ね一様に分布しており、

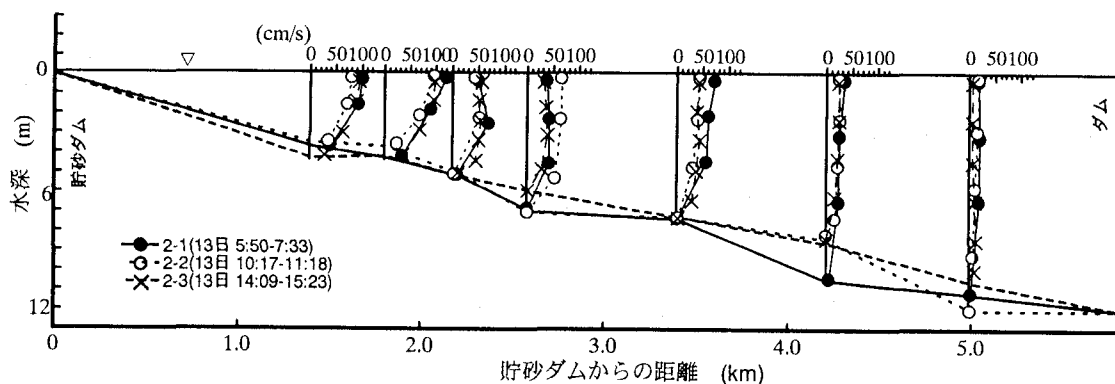


図-3 湖内の流速分布の観測値

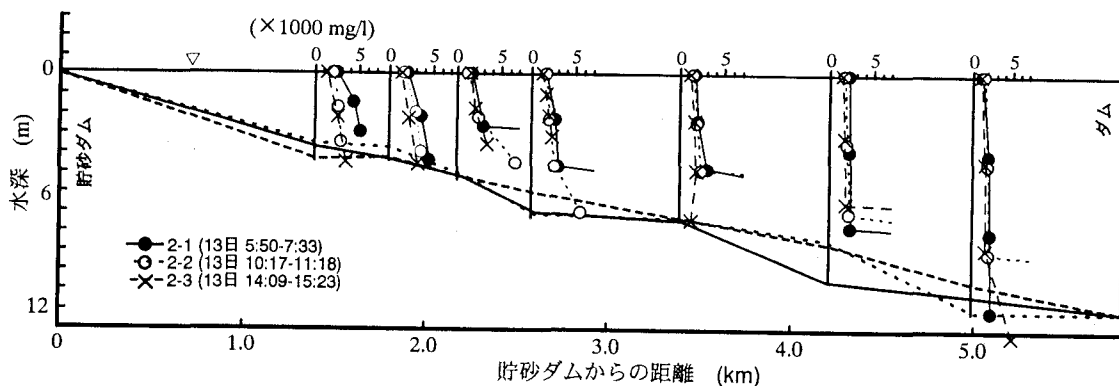


図-4 湖内のSS分布の観測値

1,000～6,000mg/l と高濃度の濁水が混合した状態で存在していた。また、河床付近では 100,000 mg/l を超える値も観測された。これらは、平水時の数百倍の濁水の流入である。

安芸・白砂^{2),3)}によれば貯水池の濁水の流動は次の判断基準により、成層型と混合型を区別している。

$$\alpha = \frac{\text{貯水池年間総流入量}}{\text{貯水池総容量}}$$

$$\beta = \frac{1 \text{ 洪水総流量}}{\text{貯水池総容量}}$$

$\alpha < 10$ 安定した成層型

$\alpha > 20$ 混合型

また、 $\alpha < 10$ でも $\beta > 1$ の様な大洪水では成層は破壊し混合型に変化してしまう場合がある。

沙流川における貯水池年間総流入量は約 $1.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ であり、 α は約 37 となる。よって、 $\alpha > 20$ であり、安芸・白砂の判断基準と一致している。また、今回の洪水では β は 2.3 と 2.5 となり、2回の洪水でダム湖内の水が約5回入れ代わったことになる。

(5) 流入土砂

図-5 は貯砂ダム（流入部）における洪水期間中の流量と SS の関係を示したものである。これに最小自乗式をあてはめると

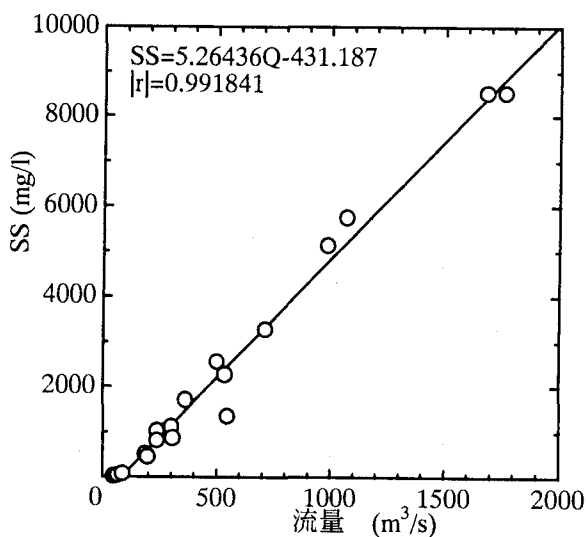


図-5 貯砂ダムにおける流量と SS の関係

$$SS=5.26436Q-431.187$$

となる。この式を用い、ダム湖内への流入流量の時間変化から SS の流入量の変化を算定し次に続く数値シミュレーションの流入土砂量とした。

図-6 は湖内最上流観測地点における 10 日の 2 回目の観測時に採水した濁水の粒度分析結果より求めた SS 粒度分布を示している。0.011～0.044mm の粒径が最も多く、また、0.07mm 以上のものは 8% 程度でほとんど含まれていなかった。

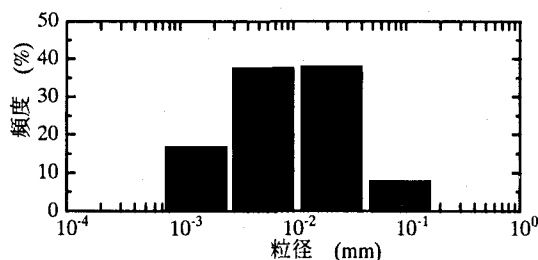


図-6 SS 粒度分布

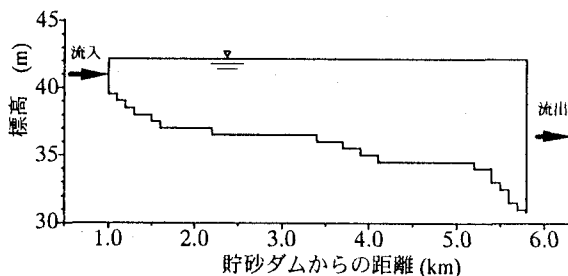


図-7 計算領域

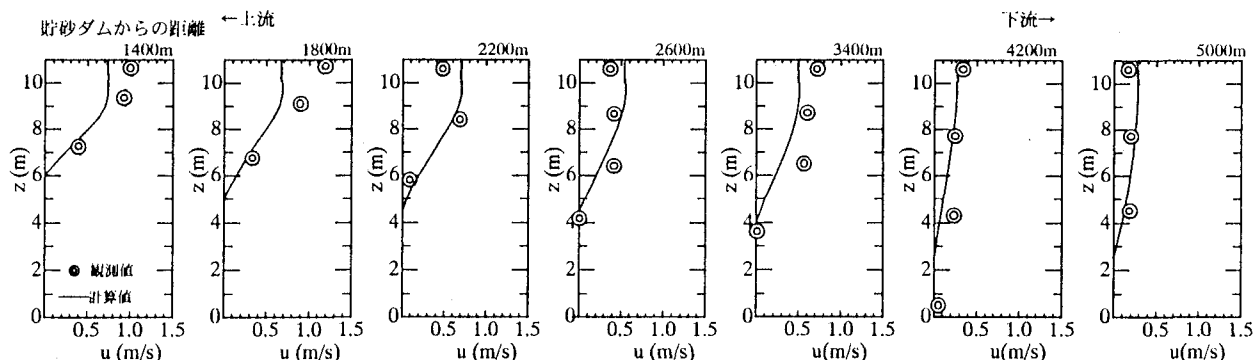


図-8 ダム湖内の流速分布(1997年8月13日6:00)

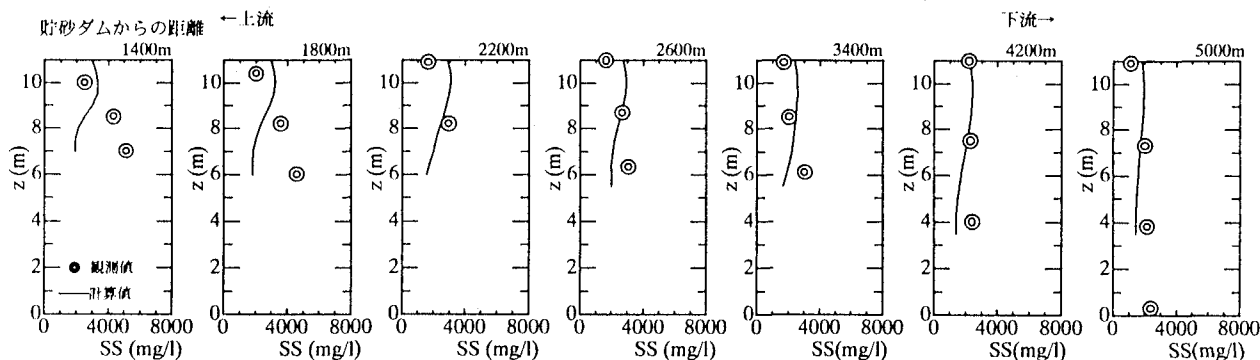


図-9 ダム湖内のSS分布(1997年8月13日6:00)

3. 浮遊砂の数値シミュレーション

観測結果より、ダム湖内を流下する濁水は底層を流れる泥水（推定）と浮遊状態の濁水が考えられる。ダム湖内の土砂収支を考えた場合、底層を流れる泥流は速度が非常に遅く、ダム湖内途中で停止している可能性もある。よって、ここでは、混合状態で流下した浮遊土砂について検討を行った。また、浮遊土砂については粒度分析結果より、4代表粒径の混合粒径として、解析を行った。

(1) 基礎式および計算条件

ダム湖内の平均河床勾配は約 1/400 であり、 x 方向の流速に対し z 方向の流速は非常に小さいので w は無視した。また、圧力は静水圧と仮定した。よって運動方程式は x 方向のみを用いた。

a) 連続式および運動方程式

連続式

$$B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(B \int_h^H u dz \right) = 0$$

運動方程式

$$B \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (u^2 B)}{\partial x} = -g \frac{\partial (HB)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial (uB)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial (uB)}{\partial z} \right)$$

土粒子濃度の連続式

$$B \frac{\partial c_n}{\partial t} + \frac{\partial (u c_n B)}{\partial x} - w_f \frac{\partial (c_n B)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial (c_n B)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial (c_n B)}{\partial z} \right)$$

ここで、 H :水位、 h :河床高、 B :ダム湖内河幅、 u :流速、 ϵ_x : x 方向の拡散係数、 ϵ_z : z 方向の拡散係数、 c_n :土粒子濃度($n:1 \sim 4$)、 w_f :土粒子の沈降速度である。沈降速度 w_f は Rubey の実験式を用いた。

計算メッシュは $\Delta x = 100\text{m}$ 、 $\Delta y = 0.5\text{m}$ 、 $\Delta t = 10\text{s}$ 、流下方向: 48 メッシュ、鉛直方向: 22 メッシュで与えた。拡散係数は $0.01\text{m}^2/\text{s}$ で与えた。計算領域を図-7 に示す。

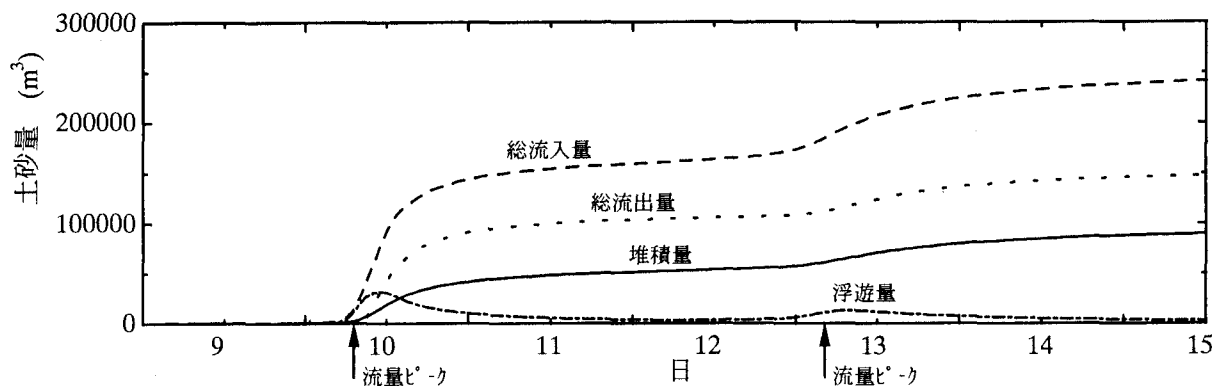


図-11 土砂収支の時間変化

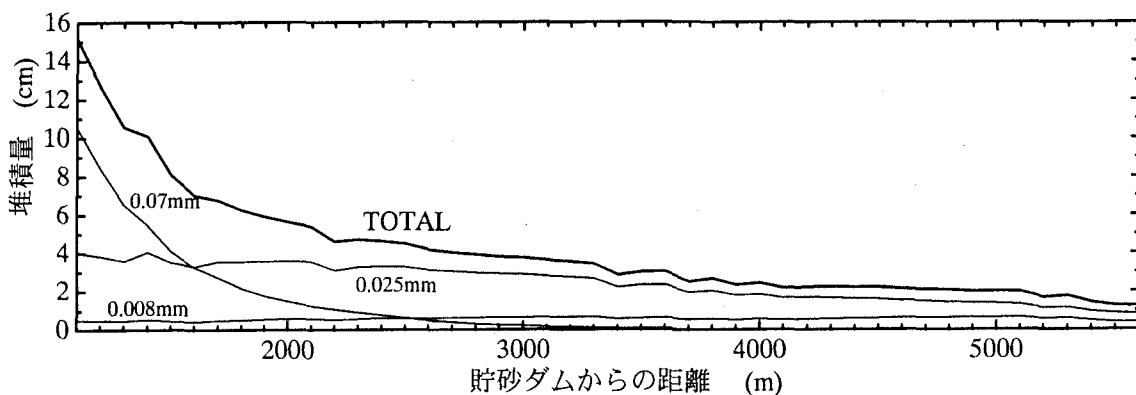


図-12 粒径別堆積量の縦断分布

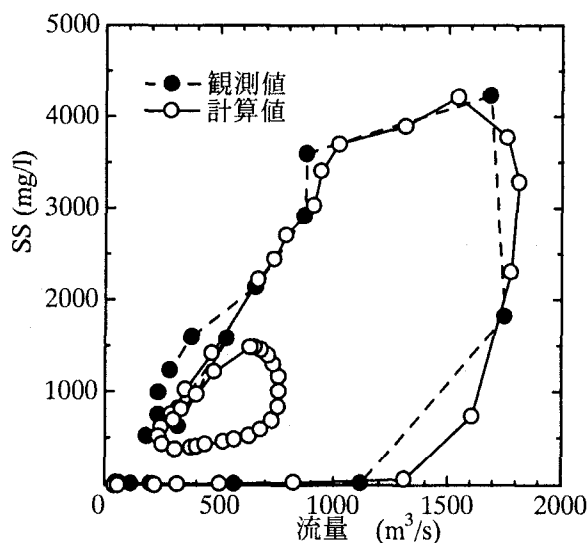


図-10 ダム流出部における流量とSSの関係

b) 境界条件

上流端境界はダムへの流入量を対数則により、流速分布で与えた。流入する土粒子は観測値より求めた流量と濁度の相関式から換算した濃度を粒度分析結果より 0.002, 0.008, 0.025, 0.07mm の 4 粒径として図-6 に示す割合で与えた。観測期間中は流入・流出流量は概ね平衡状態であり、またダム放流口の影響はダムから 800m 地点の流速の鉛直分布の観測結果よりほとんどないと考えられるので、下流端境界では上流端境界と同じ流量を対数則で与えた。上

端境界（水面）はせん断力が無いものとして与えた。下端境界（底面）は流速=0、浮遊砂濃度は沈降と巻き上げによる浮上量を考慮した。土粒子の単位面積当たりの浮上量は板倉・岸⁴⁾の式を用いた。

(2) 数値シミュレーションによる再現

a) SS・流速の鉛直分布

図-8、9 はダム湖内の各観測地点における流速および SS の鉛直分布について観測値と計算値を比較したものである。流速分布は多少の違いはあるが概ね再現できているといえる。次に、SS の分布は上流部を除いて観測、計算結果ともに深さ方向に概ね一様に分布している結果となった。

b) 流出部における流量と SS の関係

図-10 は観測値と計算値の流出部（放流）における流量と SS の関係を示したものである。ダム湖からの流出地点における SS は洪水の初期段階にはダム湖内の濁りの少ない水が押し出されるため、流量との相関が低い。図より観測値と計算値がよく一致しており、流量が約 1,300m³/s になった時に流出部での SS 濃度が上昇していることがわかる。

c) 土砂量収支

図-11 に計算により得られた土砂量収支の時間変化を示す。各時刻において、総流入土砂量が流出、堆積、浮遊のどの状態になっているかがわかる。9

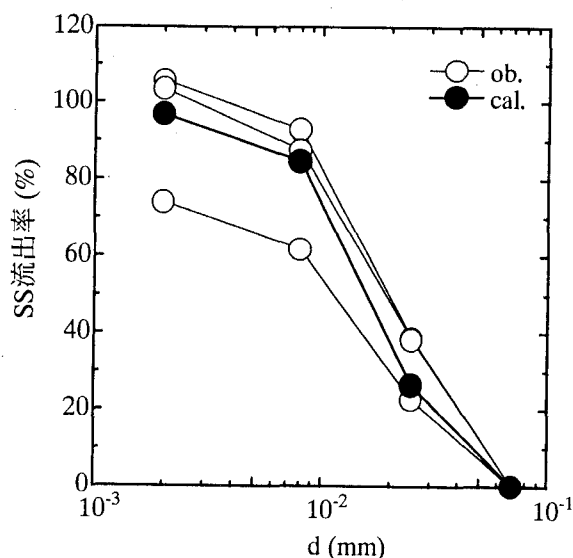


図-13 粒径とSS流出率の関係

～15日の間で総流入土砂量約 $240,000\text{m}^3$ に対し、総堆積量は $90,000\text{m}^3$ であり、約4割が堆積していることがわかる。さらに、計算による粒径別堆積量の縦断分布を図-12に示す。堆砂量は上流端が最も多く、ダムより3.5kmまでで急激に減少し、これより下流では概ね一様に堆砂している結果となった。また、粒径別に見ると0.07mmの比較的大粒径の土砂はダムより2.5kmまでで沈降しており、粒径0.025では上流から下流にかけて緩やかに減少し、0.008mmの土砂は上流から下流にかけて一様に堆積する結果となった。また、0.002mmの土砂はほとんど堆積していなかった。さらに、粒径別に流入土砂量と流出土砂量を比較する。図-13は粒径とSS流出率の関係を示したものである。ここでSS流出率は流出部SS/流入部SSとする。観測値のSS流出率は各観測毎に得られた湖内最上流観測地点と最下流観測地点の粒径分布データを用いており、13日の上・下流地点での観測の時間差と土砂の流下する時間差がともに1～1.5時間程度であるのでこの値を用いる。計算値については、計算期間中の各粒径毎の総流入土砂量と総流出土砂量より求めている。これより、粒径が大きくなるにつれSS流出率が低下しており、粒径0.01mm付近を境にそれ以下のものはほとんどが流出し、それ以上のものは湖内に堆積していること推定された。

4. おわりに

本研究は北海道の沙流川流域二風谷ダムにおいて既往最大クラスの出水時に行った観測と数値シミュレーションによる再現の結果を報告するものである。沙流川流域において1997年8月に起きた出水により数千mg/lの濁水が観測された。この中で、貯水池内の観測結果より、流下土砂は河床付近で高濃度の泥流(推定)と、鉛直方向に混合した浮遊状態で流下していることが分かった。また、流速分布は上流では上方ほど速く、下流では河床を除いて一様に分布していた。さらに、数値シミュレーションによりダム湖内の濁水の挙動を再現した結果、ダム湖内に堆積する土砂量はダム湖内へ流入した土砂量の約4割であり、大部分が粒径0.01mm以上のもので占められていることがわかった。

最後に、本報告は出水時より、僅かな時間しか経過しておらず、十分な検討がされてない部分もあるが観測結果の速報性を考慮して発表を行うものである。

謝辞：本研究は北海道開発局室蘭開発建設部沙流川ダム建設事業所、二風谷ダム管理所、開発土木研究所河川研究室、(株)北開水工コンサルタント、(株)福田水文センターなど非常に多くの方々の方々の多大な協力を得て行われた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1)長谷川和義, 道口敏幸, 柿崎恒美, 大串弘哉: 石狩川における乱流と浮遊砂の同時計測, 土木学会北海道支部論文報告集第47号, pp.347-352, 1991
- 2)吉川秀夫: 流砂の水理学, 丸善, 1985
- 3)安芸周一: 貯水池濁水現象, 土木学会水理委員会, 水工学シリーズ75-A1, A-1-1～A-1-26, 1975.
- 4)Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments. *Proc. of ASCE, HY8*, pp.1325-1343, 1980.

(1997. 9. 30 受付)