

## 1-14 貯水池堆砂の予測手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：水工研究グループダム水理チーム

研究担当者：柏井条介、櫻井寿之、鈴木判征

### 【要旨】

流域の土砂管理に対する要求が高まる中、流下土砂量を知るための情報源として粒度構成を含むダム堆砂量の解析が必要となっている。また、より適切な貯水池堆砂計画などのため、貯水池堆砂形態の精度のよい推定方法が求められている。本調査では、近傍類似ダムの堆砂実績に基づく平均的な年堆砂量の予測手法、年堆砂量変動の評価方法を提示するとともに、堆砂実績では把握できない微細粒子の捕捉率について実測に基づく解析を行い、推定方法を示した。更に、ポーリング調査に基づき、堆砂の粒度構成や空隙率の特性を明らかにした。また、貯水池内の分級・堆砂過程を再現するため、有限体積法及び MacCormack 法の両者による 1 次元の非定常計算モデルを作成するとともに、みお筋の形成を再現する平面 2 次元モデルの原型を作成した。14 年度は最終年度であり、以上の検討を継続実施しとりまとめた。

キーワード：貯水池、堆砂、捕捉率、粒度分布、河床変動計算

### 1. はじめに

流域の土砂管理に対する要求が高まる中、流下土砂量を知るための情報源として粒度構成を含むダム堆砂量の解析が必要になっている。また、より適切な貯水池堆砂計画などのため、貯水池堆砂形態の精度のよい推定方法が求められている。

本調査では、こうした問題を解決するため、貯水池堆砂実績などに基づく貯水池流入土砂量と粒度分布の予測手法、ダム貯水池内の分級・堆砂過程を再現するための数値シミュレーションモデルについて検討を行っており、最終年度である 14 年度は、これら検討を継続実施するとともに、検討結果をとりまとめた。

### 2. 調査方法

#### 2.1 貯水池流入土砂量の予測方法の検討

貯水池流入土砂量の最も中心的な情報源は堆砂量であり、流入量に対し、常時貯留している水量の大きいダムでは、流入土砂量のほとんどは、貯水池において捕捉される。一方、総貯水容量 100 万 m<sup>3</sup>以上の貯水池では、毎年の堆砂測量により年間堆砂量（見かけ体積）が得られており、本調査では、大半の土砂が捕捉されていると考えられる貯水池を対象に、近傍類似ダムからの年平均堆砂量の推定方法について考察を加えるとともに、幾つかの実施事例をもとに、精度向上を目指しての今後の方向性を検討

した。また、実績の年間堆砂量の変動はかなり大きく、土砂管理の観点からは、平均量のみでなく、変動量を把握することも重要である。本調査では、変動量の評価方法として水文統計で用いられている各種確率分布の適用を考え、その適用性を検討するとともに、確率評価により期待値として求められる年平均堆砂量と実績堆砂量の関係を調査した。

以上は、堆砂実績に基づく検討であるが、微細粒子については、貯水池を通過する成分の存在が考えられる。そこで、微細粒子の捕捉率について、国土交通省管理ダムを対象に実施された貯水池末端及び放流水の濁水調査をもとに、単純なモデルによる解析を加え、推定方法を提示した。

貯水池の粒度分布については、国土交通省管理ダムのポーリング調査結果をもとに、粘土、シルト、砂、礫の構成率を把握するとともに、地質条件との関係について定性的考察を加えた。また、空隙率と粒度分布の関係を分析し、堆砂の見かけ体積と実質体積の関係を明らかにした。

以上得られた広範にわたる結果をもとに、堆砂計画や通過土砂量予測など幾つかの実際問題の場における本調査結果の利用方法をとりまとめた。

#### 2.2 堆砂の数値シミュレーションモデルの検討

貯水位変化が大きい貯水池堆砂では、常流と射流の混在した流れが生じる。また、顕著な分級作用が

生じるためこれらを再現できるモデルが必要になる。

平均的な堆砂面変化を求める堆砂計算は、一次元河床変動計算がその具体的内容になる。常流・射流が混在する場合の計算方法として、土木研究所では、不等流計算に基づくモデルを作成しているが<sup>1)</sup>、不等流計算では、解存在の判別や差分方向の判別、跳水の取扱いなどが煩雑であり、かつ、射流域では断面の取り方により解が求まらない場合が多く生じる問題があった。そこで、本調査では、各種判別等の取扱いが単純な非定常計算による方法を適用するものとして、有限体積法及び MacCormack 法によるモデルを作成し、試行計算を実施した。

一次元河床変動計算では、水位低下時のみお筋の形成過程は再現できない。大規模な水位低下による排砂を実施する場合などには、こうしたみお筋の形成が問題になる場合もあり、こうした場合のモデルとして、平面2次元による数値シミュレーションモデルの原型を作成した。平面2次元による数値計算は計算負荷の大きいものであるが、短期間の現象を対象とするのであれば、適用可能なものとする。

### 3. 調査結果

#### 3.1 貯水池流入土砂量の予測

##### 3.1.1 堆砂実績に基づく年平均堆砂量の推定

表-1 に、類似ダムの抽出において考慮すべき現象及びこれに係わる代表的なパラメーターを抽出して示す。表は、経験式で提案されているパラメーターを参考に作成したものである。

ここで、近傍類似ダムの意味を考察すると、上述の堆砂関連パラメーターのうち、幾つかのパラメーターは当該ダムとほぼ同様の値をとり、その影響評価を省略できることを期待していることを意味している。図-1 はこのような考えのもと年平均堆砂量と崩壊地面積率の関係を整理した例である。崩壊地面積率は、比堆砂量と表-1 の各パラメーター（定量化の難しい地質を除く）との相関関係を調査し、代表的なパラメーターとして抽出したものである。何れの地域も崩壊地面積率との比較的良好な相関が得られている。今後更に検討実績の蓄積を行っていく必要があると思われるが、有用なパラメーターの一つとして崩壊地面積率を挙げることができると思われる。

##### 3.1.2 年堆砂量の変動評価

本調査で対象としたデータは、旧土木研究所が平

表-1 近傍類似ダム抽出のためのパラメーター例

現象	影響因子(I)	影響因子(II)	具体的パラメーター例
流入土砂関係	土砂生産基盤	地質	花崗岩等岩石種
		傾斜	平均地形勾配 起伏度
		植生	森林率、林相
	土砂輸送	崩壊地	崩壊地面積率
		水文	平均年間降水量
貯水池捕捉関係		河道	平均河床勾配 平均年間貯水池回転率

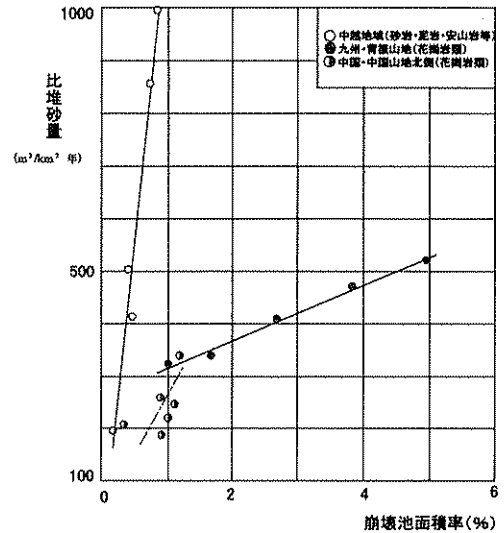


図-1 比堆砂量と崩壊地面積率の関係 (近傍類似ダム)

表-2 年堆砂量の確率分布の計算不能ケース及び適合性(128ダム中)

分布形	略称	計算不能 ケース数	SLSLC推 小ケース	SLSLC 平均値	相関係数 平均値
指数分布(L積率法)	Exp	1	28	0.035	0.925
グンベル分布	Gumbel	1	11	0.1	0.923
平方根指数型最大値分布	SQRTE	82	3	0.121	0.953
一般化極値分布	GEV	6	34	0.058	0.969
対数ロジスティック分布(実数空間法)	LP3Rs	40	1	0.082	0.954
対数ロジスティック分布(対数空間法)	LogP3	1	83	0.049	0.968
岩井法	Iwai	17	38	0.049	0.974
石原・高瀬法	IshiiTake	68	2	0.088	0.955
対数正規分布3母数(クォンタイル法)	LN3Q	16	19	0.048	0.979
対数正規分布3母数(積率法)	LN3PM	77	0	0.071	0.955
対数正規分布2母数(L積率法)	LNLM	0	16	0.065	0.963
対数正規分布2母数(積率法)	LN2PM	0	2	0.062	0.961

成3年度に実施したアンケートにより収集されたデータであり、アンケート回収ダムのうち、経験年数が10年以上、データにマイナス値を含まないなどの条件に見合う128ダムを対象に、水文統計ユーティリティ Verion1.3 ((財)国土技術開発センター)を用いて実施した。

表-2 に確率分布と堆砂データの計算結果を示す。

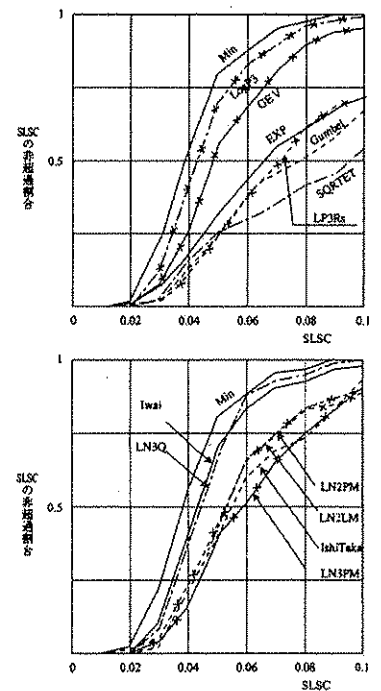


図-2 確率分布とSLSLCの非超過割合の関係(計算可能ケース)

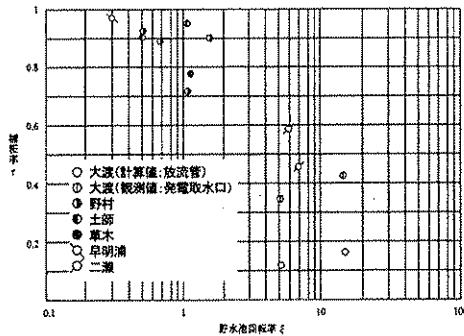


図-3 観測値による $\tau$ と $\xi$ の関係

表中「計算不能ケース数」は、水文統計ユーティリティで計算できなかったダム数を、「SLSC 最小ケース」は、最小の SLSC 値が得られたダム数を表している。表より、最小の SLSC となる頻度が最も高いのは LogP3 であり、Iwai、GEV がこれに続く。128 ダムのうち 73% のダムでは、この 3 モデルで最小の SLSC が与えられている。降雨量の統計では、Gumbel、GEV、SQRTET が優先的に検討されているようであるが、年堆砂量については、適当な選択とはいえないようである。

図-2 に計算可能ケースにおける各確率分布と SLSC の非超過割合の関係を示す。図中の Min は、最小の SLSC を用いた場合を表している。非超過割合は、LogP3、GEV、Iwai、LN3Q が上方にあり、他の分布モデルはこれらと比べかなり下方にある。

降雨量の統計では適用可能な SLSC として 0.04 以下が推奨されている。この場合、適合度の高い LogP3 で 40% 程度のダムで、また、全分布モデルの最小値では 50% 強のダムで適合する。水文における 0.04 の値は適合度合い等を参照しての設定であり、必ずしも推定精度上の絶対的な意味をもつものではない。堆砂の適合性は降雨量の統計資料よりはやや劣るようであり、これにこだわる必要はないであろう。因みに、SLSC を 0.05 以下とすると、LogP3 では 70% 程度、最小値を用いた場合には 80% 程度が適合することになり、降雨量資料と比較して若干劣るものの、確率評価は十分可能と見てよいものと思われる。

検討は、この他、確率評価に基づく期待値として年平均堆砂量を求める方法についても実施している。

### 3. 1. 3 微細粒子の捕捉

国土交通省（当時建設省）のいくつかの管理ダムでは、平成 9 年～11 年度にかけて出水時の流入・放流水の SS 調査を実施しており、図-3 にこれら調査結果をもとに作成された SS 成分の捕捉率 $\tau$ と 1 洪水あたりの貯水池回転率 $\xi$ （＝1 洪水当りの総流入

量／洪水開始時の貯留量）の関係を示す。

図-3 によれば、データは少ないものの比較的まとまりのある関係が得られており、回転率のべき乗に反比例して捕捉率が低下していく。回転率 1 以下では捕捉率は 0.8～0.9 程度以上であり、捕捉率は回転率 1 以上において急激に減少している。従って、捕捉率の推定は、回転率 1 以上において特に重要になるものと考えられる。

なお、観測された流入 SS の粒度構成によれば、ダムごと、採水時ごとの変化はあるものの、全体的には比較的まとまりのある値を示しており、 $d_{15}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_{84}$  は、それぞれ 3～6  $\mu\text{m}$ 、10～20  $\mu\text{m}$ 、20～40  $\mu\text{m}$  程度となっている。

ここで、捕捉率の中心的なパラメータを明確にするとともに、概略的でもより簡便な方法を提示することを目的に、①貯水池形状は三角錐形状とする、②貯水池水面は水平、③上下流方向に分割した  $\Delta x$  間の土砂濃度は一定で、流出する土砂濃度と等しい、④粒子は静水中の沈降速度で沈降する、⑤堆積した土砂の再浮上はない、⑥土砂濃度の拡散の影響は無視する、の仮定を設ける。更に、貯水量は洪水中を通じ一定、洪水継続時間間の流入量は一定の条件を仮定すると、次式を得る。

$$\Delta C_x = \frac{1}{T_0} \left\{ \xi C_{x+\Delta x} - \left( \xi + \frac{3T_0 u_s}{H_0} \right) C_x \right\} \times \frac{\left( 1 - \frac{x}{L_0} \right)^2 - \left( 1 - \frac{x+\Delta x}{L_0} \right)^2}{\left( 1 - \frac{x}{L_0} \right)^3 - \left( 1 - \frac{x+\Delta x}{L_0} \right)^3} \Delta t \quad (1)$$

$$\text{出水当りの捕捉率 } \tau = 1 - \frac{\sum_{T_0} C_{x=0}}{\sum_{T_0} C_{x=L_0}} \quad (2)$$

ここに、 $x$ ：ダムからの距離、 $C_x$ ：土砂濃度、 $\xi$ ：貯水池回転率、 $T_0$ ：洪水継続時間、 $H_0$ ：ダム位置水深、 $L_0$ ：貯水池延長、 $u_s$ ：沈降速度である。

図-4 に観測結果と計算結果を比較して示すが、モデルや計算条件の大胆な単純化にも拘わらず計算値は観測値等を比較的よく表している。従って、出

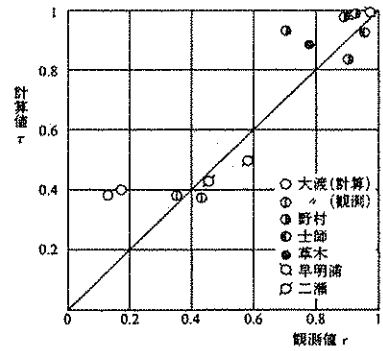


図-4  $\tau$ の観測値と計算値の比較

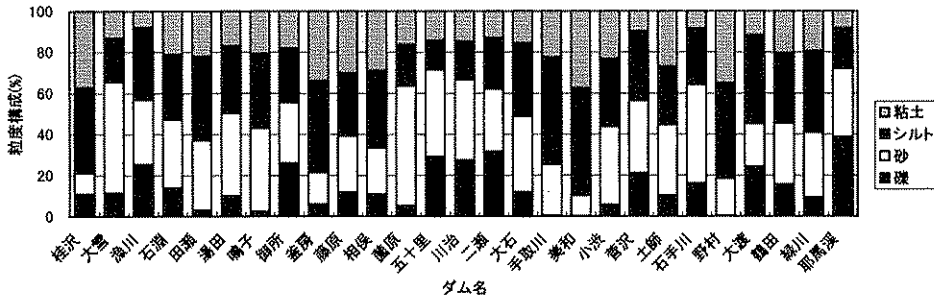


図-5 堆砂全体の粒度構成

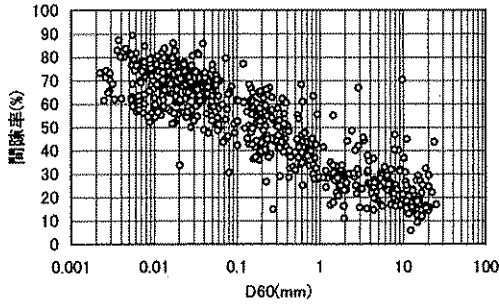


図-6 ボーリングサンプルの60%粒径と間隙率の関係

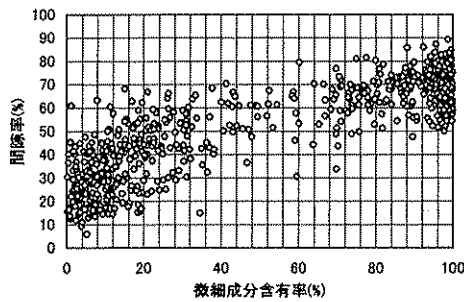


図-7 ボーリングサンプルの微細成分含有率と間隙率の関係

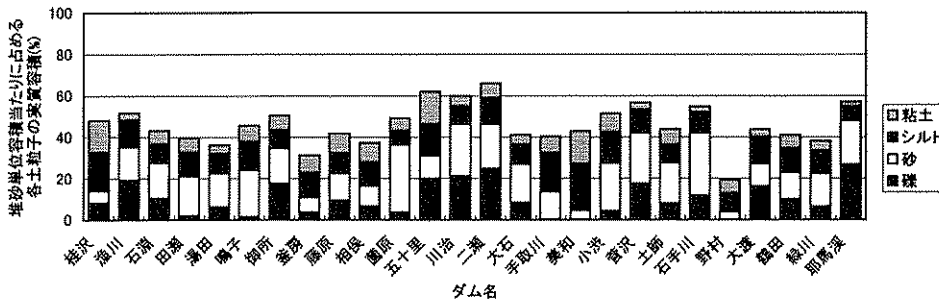


図-8 堆砂の土粒子実質部分の粒度構成

水時の捕捉率を貯水池の回転率、粒子の沈降速度、洪水継続時間、貯水池水深にて概ね表すことができる。上記結果を用い、ある期間での捕捉率  $\tau_i$  を次式にて推定することができる。

$$\tau_i = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i \int Q^\beta dt)}{\sum_{i=1}^n \int Q^\beta dt} \quad (3)$$

ここに、 $\tau_i$  : 出水当りの捕捉率、 $Q$  : 流入量、 $\beta$  : 水量とウォッシュロード成分の流砂量の間係数を表す

べき乗の係数（2がよく用いられる）である。

### 3.1.4 貯水池堆砂の粒径別の構成

水池堆砂の粒径別の構成を把握するために、全国30程度のダムで行われた現地ボーリング調査の結果を整理し解析した。

図-5 に解析例として調査ダムの堆砂全体の粒度構成を示す。これは、各ダム貯水池について、前述のボーリングの粒度構成割合にボーリングの代表する堆砂量を掛け合わせ、その後足し合わせて求めたものである。ここで、ボーリングの代表する堆砂量については堆砂横断測量結果から領域を割り振って求めた。図より貯水池によって、粒度構成はかなり異なっているが、今回の調査の堆砂体積に占める微細成分の割合の最大値は90%、最小値は28%、平均値は54%であった。また、平均的な粒度構成としては、礫：14%、砂：32%、シルト：34%、土：20%であった。

図-6、7には、ボーリングサンプルの土質試験結果より求めた各試料の間隙率と60%粒径、細成分含有率の関係を示す。これをみると、60%粒径が小さいほど、また微細成分含有率が大きいほど間隙率は大きくなっている。また、微細成分含有率は、小さい領域と大きい領域に集中しており、中間の値を持つサンプルは少ない。微細成分が100%近い場合には、間隙率は60~80%の値、微細成分が0%に近い場合は10~40%の値を示している。

それぞれの試料の間隙率を考慮して求めた堆砂全体の土粒子実質部分についての粒度構成を図-8 に示す。この図は、堆砂体積を基準として示しており、100%に満たない部分は堆砂容積中に空隙（水）が占める割合を表している。実質容量でみた場合の堆砂に占める微細成分の割合は、平均で約44%である。各貯水池で捕捉される微細成分実質容量の比堆砂量を求めると10~468 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年の範囲にあり、平均値は100 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年である。なお、微細成分含有率が大きい貯水池と小さい貯水池を抽

出して、地形・地質概要の文献調査を行った結果によると、流域が主に火成岩・変成岩によって構成される貯水池は細粒分が少なく、堆積岩で構成される貯水池は細粒分が多い傾向が認められた。

なお、解析は、この他、上下流方向の粒度分布などに対しても実施している。

### 3. 1. 5 流入土砂量の推定方法

以上、各項目ごとの検討結果を示した。ここで、以上の結果をもとに当該地点での流入土砂量を推定する場合の手順を整理すると次の通りである。

#### 1) 既設ダム堆砂量の捕捉率による補正

①粒度構成より、捕捉率が問題となる微細成分（ウォッシュロード）とそれ以外の成分の構成比率を求める。構成比率を求める。ウォッシュロード成分でも粒径の大きな成分は、回転率が非常に大きくない限りほとんどが捕捉されるので、境界の粒径にそれ程神経を使う必要はない。多くの場合、0.1mm 以下、或いはシルト以下といった分け方で問題ないものとする。

粒度構成については、ボーリング調査を行うのが最も望ましいが、周辺に類似ダムがあれば、その結果を参考に設定することも可能である。流域状況が同様であれば、3. 1. 4 の結果を参照にすることもできる。微細粒子成分のもつ重要度に合わせて調査レベルを検討する。

②微細成分の粒径ごとに、3. 1. 3 に示した方法により捕捉率を算定し、既設ダム堆砂量の補正を行い当該ダムの流入土砂量を求める。このとき、粒径別の流入土砂量が求められる。

流入土砂量の変動については、3. 1. 2 に示した方法により、年間土砂量を評価することができる。ただし、粒径別の変動は現状では求めることができないので、別途検討する必要がある。

#### 2) 既設ダム以外の地点での推定

近傍類似ダムの堆砂実績値の代わりに、1) で求められる既設ダムの流入土砂量を用い、3. 1. 1. に示す方法で求める。流域地質条件などが類似であれば、粒度構成についても、近傍類似ダムのそれから推定することも可能と思われる。また、年変動量についても、同様に推定が可能と思われるが、具体的方法については、更に検討が必要である。

新設ダムの堆砂量予測であれば、求められた流入土砂量、粒度構成をもとに、捕捉率を算定し、流入土砂量を堆砂量に変換すればよい。このとき、確率

分布の適合性がよければ、近傍ダムの実績値として、確率評価から計算される期待値を用いるのが望ましい。

今後検討すべき課題も多く残されているが、以上示すように、本調査結果により、流入土砂量を推定するための基本的な手段、情報は提供されたものとする。

## 3. 2 堆砂の数値シミュレーションモデル

### 3. 2. 1 1次元河床変動計算によるシミュレーション

本調査では、基礎式として非定常のものを用いることとし、数値計算法と有限体積法（移流項に一次精度風上差分を用いる）と MacCormack 法の二つを採用した。また、土砂の粒径については、混合粒径を取り扱うものとし、土砂の輸送形態としては掃流砂と浮遊砂を計算するものとした。モデルの基礎式及び離散化式を表-3、4 に示す。

作成した堆砂再現モデルの基本性能を把握するために、仮想的な貯水池を設定して2種のケースについて堆砂計算を実施した。

ケース1は、有限体積法とMC法の基本的な特性の比較を目的として、単純な一様粒径掃流砂について、堆砂計算と排砂計算を行ったもので、計算結果

表-3 1次元河床変動モデルの基礎式

<p>流れの連続式</p> $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ <p>流れの運動方程式</p> $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} + gA \frac{\tau_{bx}}{\rho g R} = 0$ <p>流砂の連続式</p> $\frac{\partial}{\partial t} \{ (1-\lambda)A_s \} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \sum_j Q_{sj} \right) + \sum_j B_{sj} (q_{sj} - q_{sj}) = 0$ <p>粒径別浮遊砂輸送方程式</p> $\frac{\partial (\bar{C}_j A)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{C}_j Q)}{\partial x} = B_{sj} (q_{sj} - q_{sj})$ <p>交換層内における粒径別土砂収支式</p> $\frac{\partial}{\partial t} \{ (1-\lambda)A_s P_j \} + p_j \frac{\partial}{\partial x} \{ (1-\lambda)(A_b - A_c) \} + \frac{\partial Q_{sj}}{\partial x} + B_{sj} (q_{sj} - q_{sj}) = 0$ $\frac{\partial}{\partial t} \{ (1-\lambda)(A_b - A_c) \} \geq 0 \text{ の時 } p_j = p_j$ $\frac{\partial}{\partial t} \{ (1-\lambda)(A_b - A_c) \} < 0 \text{ の時 } p_j = P_{0j}$ <p>A: 流水断面積, t: 時間, Q: 流量, x: 流下方向空間座標, u: 断面平均流速, g: 重力加速度, z<sub>b</sub>: 基準面からの河床高, h: 水深, τ<sub>bx</sub>: 河床に作用する応力ベクトルの x 方向成分, ρ: 流体の密度, R: 径深, λ: 空隙率(間隙率), A<sub>b</sub>: 河床材料の断面積, Q<sub>sj</sub>: 粒径 j の掃流砂量, B<sub>sj</sub>: 浮遊砂の浮上・沈降が生じる川幅, q<sub>sj</sub>: 粒径別浮遊砂浮上フラックス, q<sub>sj</sub>: 粒径別浮遊砂沈降フラックス, C<sub>j</sub>: 粒径別平均浮遊砂濃度, P<sub>j</sub>: 交換層内における粒径 j の構成比率, A<sub>c</sub>: 交換層断面積, P<sub>0j</sub>: 交換層下方の粒径 j の構成比率</p>
---

表-4 1次元河床変動モデルの離散化式

1) 有限体積法  
 流れの連続式  

$$\frac{A_{i+1/2}^{n+1} - A_{i+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{Q_i^n - Q_{i+1}^n}{\Delta x} = 0$$
 流れの運動方程式  

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + \frac{u_{i+1/2}^n Q_{i+1/2}^n - u_{i-1/2}^n Q_{i-1/2}^n}{\Delta x} + g A_i^n \frac{(z_b + h)_{i+1/2}^n - (z_b + h)_{i-1/2}^n}{\Delta x} + \left( g A_i^n \frac{\tau_{bx}}{\rho g R} \right)_i = 0$$

$$a = \begin{cases} 0: u_{i+1/2}^n \geq 0 \\ 1: u_{i+1/2}^n < 0 \end{cases}, b = \begin{cases} 0: u_{i-1/2}^n \geq 0 \\ 1: u_{i-1/2}^n < 0 \end{cases}$$

$$u_{i+1/2}^n = \frac{u_{i+1}^n + u_i^n}{2}, u_i^n = \frac{Q_i^n}{A_{i-1/2+c}^n}, c = \begin{cases} 0: Q_i^n \geq 0 \\ 1: Q_i^n < 0 \end{cases}$$
 流砂の連続式  

$$(1-\lambda) \frac{A_{i+1/2}^{n+1} - A_{i+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{Q_{B_{i+1/2}}^n - Q_{B_i}^n}{\Delta x_i} = 0$$

$n$ : 過去の値 (既知数),  $n+1$ : 次の時間ステップの値 (未知数),  $i$ : 空間位置で上流から下流へ  $i=1, 2, \dots, i-1, i, i+1, \dots$  と並び,  $i+1/2$  は  $i$  と  $i+1$  の位置の中点位置を表す。

2) MacCormack 法  
 基礎式の一般形  

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = C$$
 予測子:  $U_i^p = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_{i+1}^n - E_i^n) + \Delta t \cdot C_i^n + V_i^n$   
 修正子:  $U_i^{n+1} = \frac{1}{2} (U_i^n + U_i^p) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (E_i^p - E_{i-1}^n) + \frac{\Delta t}{2} C_i^p + V_i^p$   
 人工粘性:  

$$V_i^n = -(D_{i+1}^n - D_i^n)$$

$$V_i^p = (D_i^p - D_{i-1}^n)/2$$

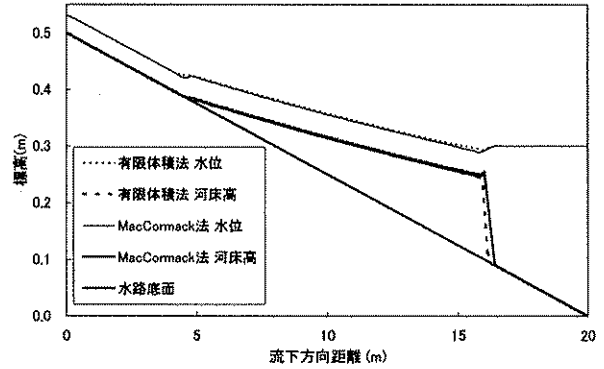
$$D_i^n = K_i u_i R_i (U_{i+1}^n - 2U_i^n + U_{i-1}^n) \frac{\Delta t}{2(\Delta x)^2}$$

$p$ : 予測値,  $n$ : 過去の値 (既知数),  $n+1$ : 次の時間ステップの値 (未知数),  $i$ : 空間位置で上流から下流へ  $i=1, 2, \dots, i-1, i, i+1, \dots$  と並んでいる。 $K_i$ : 係数。予測段階では既知の値  $U_i^n$  を用いて  $\Delta t$  後の値  $U_i^p$  が予測される。修正段階では,  $\Delta t/2$  過去の値  $(U_i^n + U_i^p)/2$  を初期値として  $\Delta t/2$  後の値  $U_i^{n+1}$  が計算され, 最終的な解となる。

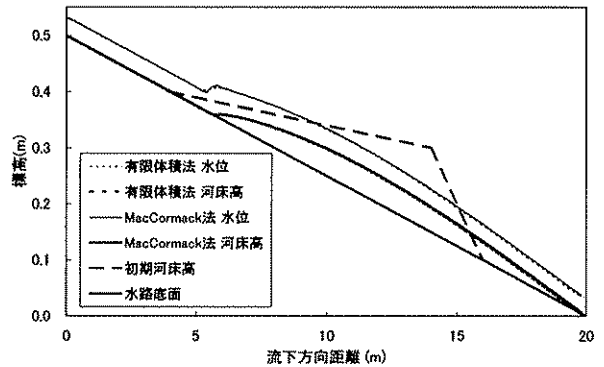
を図-9 に示す。これより, このケースでは, 計算方法による顕著な差はみられておらず, 何れの方法でも, 堆砂及び排砂過程の再現がなされている。

ケース 2 は掃流砂・浮遊砂を考慮した混合粒径モデル (MC 法を用いている) による堆砂計算であり, 現地スケールを想定した仮想的な貯水池を対象に実施した。浮遊砂量の算定については, 非平衡の運動を考慮することとし, 清水ら<sup>2)</sup> の方法に準じるものとした。また, 浮遊限界は摩擦速度が沈降速度に等しくなる条件により与えることとした。

計算結果を図-10, 11 に示す。図-10 から, 水位 50m 付近にデルタ (堆砂肩) の発達が確認できる。また, 堆砂初期にはデルタ下流に更に小さいデルタ



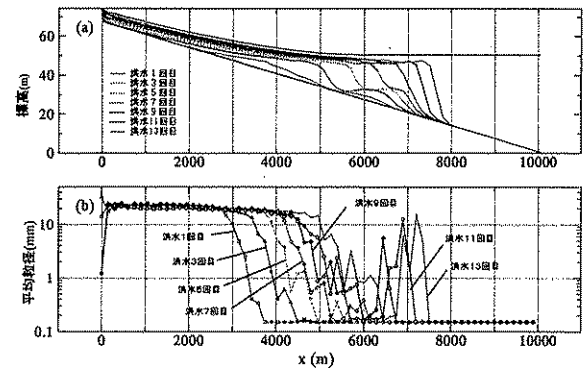
(1) 堆砂過程の計算結果 (200分後)



(2) 排砂過程の計算結果 (20分後)

計算条件: 水路幅 0.5m, 水路固定床勾配 1/40, 水路全長 20m, 流速 12.56/s, 下流端水深 0.3m, 粒径 2.177mm, 土粒子密度 2.65g/cm<sup>3</sup>, 空隙率 0.4, マニングの粗度係数 0.02m<sup>-1/3</sup>sec. 計算格子間隔 0.2m, 掃流砂量式: 芦田・道上式, 現象計算時間 400分  
 堆砂過程: 給砂量 1,236cm<sup>3</sup>/min, 初期堆砂形状なし, 上流端境界条件として流量と流砂量を与え, 下流端境界条件として水深を与え, 河床は固定とし, 流量と流砂量は流下方向勾配 0 の条件とする。  
 排砂過程: 給砂量 0, 初期堆砂形状あり, 下流端水深の境界条件を流下方向勾配 0.

図-9 堆砂・排砂の計算結果 (一樣粒径掃流砂)



(a) 堆砂形状の計算結果, (b) 各堆砂形状に対する表層土砂の平均粒径

図-10 計算結果 (河床縦断面形状と堆積土砂表層の粒度分布)

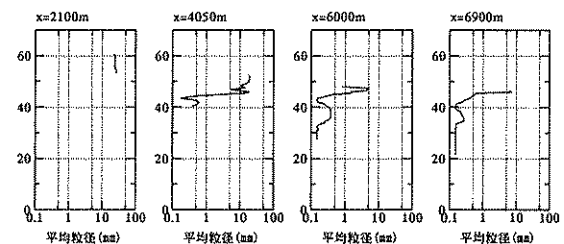


図-11 計算結果 (平均粒径の鉛直構造, 洪水 13 回目時点)

が形成され、堆砂進行に伴い、下流側のデルタが上流のデルタに飲み込まれて1つのデルタに統合されていく様子が見られている。下流側の小さいデルタは浮遊成分によるものである。図-11は堆積土砂の平均粒径鉛直分布を示したものである。粒径の細かい地層の上に粒径の粗い地層が重なる状況が見られおり、それらの層が交互に折り重なる地層が形成されている。先に述べたように、このような層構造は実際のダム貯水池でも確認されるものである。

以上示されるように、本モデルによって堆砂現象の基本特性は概ね再現されており、比較的単純な形状のダム貯水池であれば本モデルによって堆砂形状および堆積土砂の粒径分布をある程度再現できるものとする。

### 3.2.2 平面2次元河床変動計算によるシミュレーション

表-5に基礎式を示す。ただし、本モデルでは、一般曲線座標系を用いている。基礎方程式の離散化には有限体積法を用いており、移流項には1次精度

表-5 平面2次元河床変動モデルの基礎式

流れの連続式

$$\frac{1}{J} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{M}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{N}{J} \right) = 0$$

流れの運動方程式 ( $\xi$  方向)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{M}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{UM}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{VM}{J} \right) - \frac{M}{J} \left( U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left( U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left\{ \left( \frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \right) \frac{\partial z_0}{\partial \xi} + \left( \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \right) \frac{\partial z_0}{\partial \eta} \right\} + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial (-\bar{u}^2 h)}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial (-\bar{u}^2 h)}{\partial \eta} \\ & + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial (-\bar{uv} h)}{\partial \xi} + \left( \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \right) \frac{\partial (-\bar{uv} h)}{\partial \eta} + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial (-\bar{v}^2 h)}{\partial \xi} + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial (-\bar{v}^2 h)}{\partial \eta} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned}$$

流れの運動方程式 ( $\eta$  方向)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{N}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{UN}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{VN}{J} \right) - \frac{M}{J} \left( U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left( U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left\{ \left( \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \right) \frac{\partial z_0}{\partial \xi} + \left( \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \right) \frac{\partial z_0}{\partial \eta} \right\} + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial (-\bar{u}^2 h)}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial (-\bar{u}^2 h)}{\partial \eta} \\ & + \left( \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \right) \frac{\partial (-\bar{uv} h)}{\partial \xi} + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial (-\bar{uv} h)}{\partial \eta} + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial (-\bar{v}^2 h)}{\partial \xi} + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial (-\bar{v}^2 h)}{\partial \eta} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned}$$

流砂の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_s}{J} \right) + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{q_{sx}}{J} \right) + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{q_{sy}}{J} \right) = 0$$

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x = \frac{1}{x_2 y_0 - x_0 y_2}$$

$$\begin{cases} U = \xi_x U + \xi_y V \\ V = \eta_x U + \eta_y V \end{cases} \begin{cases} M = \xi_x M + \xi_y N \\ N = \eta_x M + \eta_y N \end{cases} \begin{cases} \tau_{bx} = \xi_x \tau_{bx} + \xi_y \tau_{by} \\ \tau_{by} = \eta_x \tau_{bx} + \eta_y \tau_{by} \end{cases} \begin{cases} q_{sx} = \xi_x q_{sx} + \xi_y q_{sy} \\ q_{sy} = \eta_x q_{sx} + \eta_y q_{sy} \end{cases}$$

$h$ : 水深,  $t$ : 時間,  $x, y$ : 平面内の直交空間座標,  $M, N$ :  $x, y$  方向の流量フラックス,  $U, V$ :  $x, y$  方向の水深平均流速,  $g$ : 重力加速度,  $z_0$ : 水位,  $-\bar{u}^2, -\bar{uv}, -\bar{v}^2$ : 水深平均のレイノルズ応力,  $\rho$ : 水の密度,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ :  $x, y$  方向の底面せん断応力,  $z_0$ : 河床高,  $\lambda$ : 空隙率,  $q_{sx}, q_{sy}$ :  $x, y$  方向の流砂量,  $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y, x_2, x_0, y_2, y_0$ : 各座標の各下付添え字変数による偏微分 (変数のメトリックス),  $J$ : ヤコビアン, ハット付きの変数: 各変数の反変成分を表す。

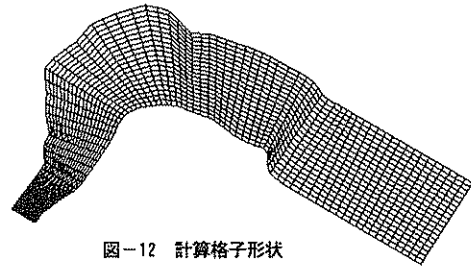
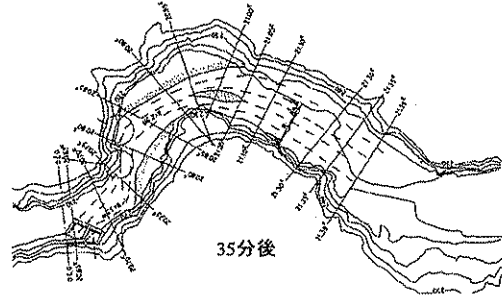
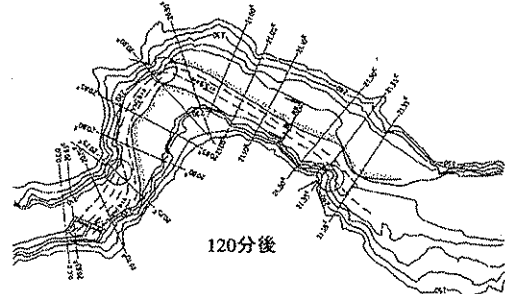


図-12 計算格子形状

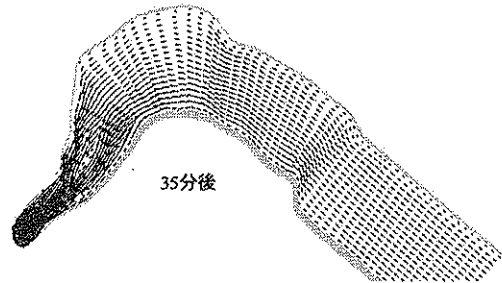


35分後

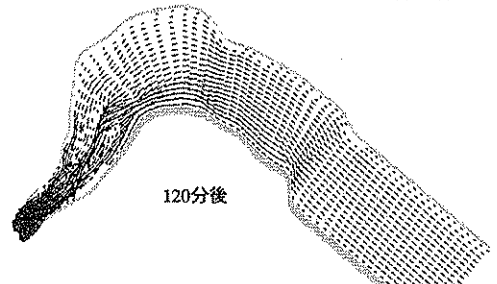


120分後

図-13 実験結果の流況



35分後



120分後

図-14 計算結果 (流速)

風上差分を用い、既往宇奈月ダム排砂の水理模型実験を対象に計算を行った。対象とした実験の模型縮尺は1/50であり、貯水池再現区間は模型値で約15m、初期河床形状は堤体より約4mが河床勾配1/13、それより上流が1/200である。河床材料は粒径0.6mmの一様粒径土砂が用いられている。流量は11.3l/s

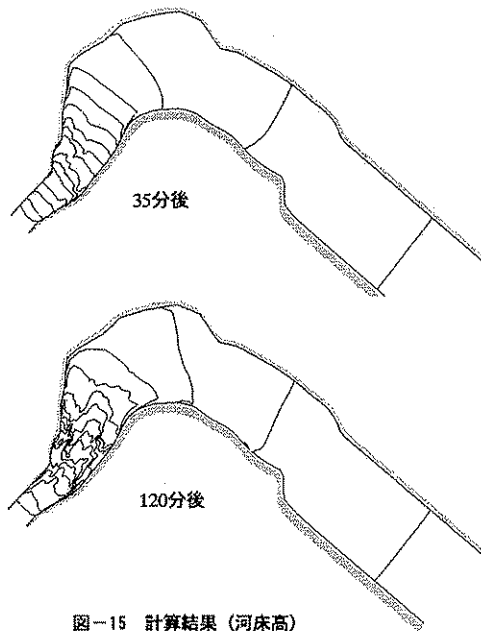


図-15 計算結果(河床高)

で一定となっており、通水時間は300分間である。

計算における流砂は、一様粒径掃流砂とし、流下方向の流砂量は実験より求められた式、流下方向と直角をなす方向の流砂量は長谷川の式を用いた。計算格子は上流部に助走区間を加えた流下方向72×横断方向21個の格子数とし、形状を図-12に示す。

実験結果の流況を図-13に、計算結果の流速ベクトルと河床高を図-14、図-15に示す。実験結果では、35分後の早い段階から滞筋が形成されており、120分後には上流部では左岸寄り、湾曲部後半下流では右岸寄りの滞筋が形成され、その後その滞筋が拡幅していくような流況を示している。計算結果をみると、堤体上流部の急勾配領域における射流についても安定して計算されているが、滞筋については、時間とともに流れが湾曲部で左岸側に寄っており、実験結果と異なっている。今後、側岸侵食の適切なモデル化を行うなどしてシミュレーションモデルの滞筋の再現性を向上させる必要がある。

#### 4. まとめ

以上の結果をまとめると以下の通りである。

まず、貯水池流入土砂量の予測方法について、以下の成果を得、成果に基づく、当該位置での流入土砂量の推定手順を整理した。

1) 近傍類似ダムの堆砂実績から推定する方法について、類似ダム選定において考慮すべきパラメータを示すとともに、類似ダムが存在する地域内の堆砂量の違いを表すパラメータとして崩壊地面積率が有用な可能性があることを示した。

2) 年堆砂量の変動の評価に、水文で用いられている確率分布を適用可能なことを示した。堆砂において適合度の高い確率分布は、LogP3、Iwai、GEVであった。

3) 微細粒子の捕捉率について、観測結果に基づき単純なモデルを作成し、出水ごとの貯水池回転率、粒子の沈降速度、洪水継続時間、貯水池水深をパラメータとした捕捉率の推定方法を示した。

4) ボーリング調査結果に基づき、堆砂の粒度構成及び空隙率の実態を把握した。

また、流入土砂量を与えられた場合の堆砂形態を予測するための数値シミュレーションについて、

5) 長期の堆砂変化を予測するための1次元河床変動計算手法として、非定常の有限体積法及びMacCormac法の両者のモデルソフトを作成し、モデル貯水池での計算により、堆砂の基本特性を再現できることを確認した。

6) 水位低下時の滞筋の形成を再現するため、平面2次元モデルのソフトの原型を作成した。

本調査は14年度が最終年度であり、概ね初期の目的を達成したと考えるが、近傍類似ダム間での主要パラメータに関する分析の蓄積、堆砂の粒度構成の影響因子の解析、数値計算モデルの検証・改良の課題が残されている、必要に応じ実施していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 高須修二、太田達雄：貯水池の排砂に関する河床変動計算、土木技術資料、31-12、1989
- 2) 清水康行・板倉忠興・岸力・黒木幹男：昭和56年8月洪水における石狩川下流部の河床変動について、水理講演会論文集、第30巻、pp.487-492、1986