ウォノギリ多目的ダム貯水池における堆砂の平面2次元解析

DEPTH-INTEGRATED 2D NUMERICAL SOLUTION OF SEDIMENTATION IN WONOGIRI MULTI-PURPOSE RESERVOIR, INDONESIA

金 海生*・大内 実**・福田忠弘**・山下直樹**・谷口雅彦*** Haisheng JIN, Minoru OUCHI, Tadahiro FUKUDA, Naoki YAMASHITA and Masahiko TANIGUCHI

A depth-integrated two-dimensional numerical analysis model, NKhydro2D, was developed to predict reservoir sedimentation. Both sediment settling to the reservoir bed and entrainment from the bed are taken into account in evaluating sediment transport and sedimentation (bed level variation). The model was then applied to Wonogiri multi-purpose reservoir in Indonesia; this reservoir has suffered serious sedimentation during the past 25 years. The sediment supply from rivers is specified as a function of discharge. Simulation results on sedimentation distribution, particle size distribution, concentration of released suspended sediment and other parameters were compared with the measurements in the reservoir. The simulation results of both sedimentation and sediment release agreed well with the measurements. It is anticipated that the method can be applied to evaluate proposed countermeasures against sedimentation phenomenon in the reservoir.

Key Words: Reservoir sedimentation, wash load, particle size distribution, sediment supply, depth-integrated 2D model, boundary-fitted coordinates

1. はじめに

河川に建設したダムによってできた貯水池に貯められ た水は様々な目的に利用される。しかし、水を貯める貯水 池ではあるが、水とともに流入する土砂の堆砂現象も避け ることはできない。計画以上に堆砂が進んだ場合、ダム貯 水池機能が著しく損なわれる可能性もあり、堆砂対策の検 討・実施が必要となる。

貯水池の堆砂には地形、水文条件などにより固有の特性 があり、その貯水池に適した対策を選定するためには堆砂 量および堆砂形状(分布)を正確に予測する必要がある。 その予測には、河床変動計算を基本とする水理数値解析モ デルが最適と考えられている¹⁾。そのようなモデルを用い、 特定地点での通過土砂量、堆砂分布、放流土砂量などを定 量的に予測することによって、堆砂原因、堆砂対策の検討 が可能となる。

著者らは、当社が国際協力機構(JICA)より受注した 「インドネシア国ウォノギリ多目的ダム貯水池堆砂対策調 査」(2004年7月―2007年7月)において、同貯水池の 堆砂状況の把握と将来予測、ならびに堆砂対策工の効果算 定を目的として、水理数値解析モデルによる堆砂解析を実 施する機会を得た。従来、貯水池の堆砂は長期的な水理現

** コンサルタント海外事業本部 地域社会事業部 水資源管理部 *** コンサルタント海外事業本部 地域社会事業部 地域整備部 象でかつ貯水池形状から、1 次元モデルで予測を行うのが 一般的である。しかし、ウォノギリ多目的ダム貯水池のよ うに流入河川が多く、平面形状が複雑な大規模ダム貯水池 の堆砂予測に対して、1 次元モデルの適用性は低い。そこ で、堆砂再現および対策案の検討に、細粒土砂の挙動を考 慮した平面 2 次元移動床水理解析モデル—NKhydro2D モ デル²⁾を適用し、解析を実施した。

本モデルは、水深平均の2次元 Reynolds 方程式を流れ の支配方程式とし、ウォノギリダム貯水池では、流入土砂 は粘土、シルトの微細粒子成分が大部分であることから、 土砂輸送については掃流砂とともに浮遊砂(Washload 含 む)輸送も考慮した。また、複雑な自然水域に対応するた め、本モデルにおいては解析メッシュとして境界適合型直 交曲線メッシュを採用した。

ウォノギリダム貯水池において、主要支川からの流入 量、流入土砂量およびダム放流量を境界条件としてシミュ レーションを実施し、解析結果を実測の堆砂量・形状およ び粒度分布、貯水池水位、放流土砂濃度などと比較して解 析モデルの再現性の検証を行い、良好な結果が得られた。 現在、検証されたモデルを用い、堆砂対策の検討を実施中 である。本稿では、解析モデルの再現性の検証結果につい て報告する。

^{*} 中央研究所 総合技術開発部

貯水池堆砂解析モデル

一部の水深の深いダム貯水池を除き、貯水池内の流れと 土砂輸送の予測に水深平均の2次元解析モデルの適用が可 能である。

河川にダムが建設された場合、河川の流れおよび土砂輸 送の連続性が遮断され、貯水池内の流速が遅くなるため、 流れとともに上流から輸送される土砂は貯水池に大量に滞 留し、貯水池堆砂現象を引き起こす。そのうち、極細かい 土砂、いわゆる Washload-粘土およびシルト流入の多い 貯水池においては、細粒土砂の堆積が貯水池堆砂の主成分 を占めるため、その取り扱いは極めて重要である。本モデ ルにおいては、細粒土砂の沈降とともに再浮上も考慮し、 全流砂の挙動を追跡することが可能である。

ダム貯水池は複雑な平面形状を有するのが一般的であ る。水理解析においてはできるだけ実水域に近い河道条件 (平面形状、抵抗など)を与えるのが最適である。そこで、 境界適合型の直交曲線メッシュをベースにした移動床水理 解析モデル-NKhydro2D により、流れおよび流送土砂の 量・堆砂分布などを予測することとした。直交曲線メッシ ュは、領域別に解析点の疎密をフレキシブルに調整するこ とができ、シミュレーションの効率化が図れる利点がある。

(1) 直交曲線座標系における流れの基礎式

水深平均の Reynolds 方程式を直交曲線座標系(ξ , η)に 変換すると(1)~(3)式になる。

<水の質量連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial (u^* h g_{22})}{\partial \xi} + \frac{\partial (v^* h g_{11})}{\partial \eta} \right] = 0$$
(1)

<流れの運動量方程式>

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu^{*})}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^{*2})}{\partial\xi} + \frac{\partial(g_{11}hu^{*}v^{*})}{\partial\eta} \right] \\ + h(u^{*}v^{*}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta} - v^{*2}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi}) = -\frac{hg}{g_{11}}\frac{\partial\zeta}{\partial\xi} \\ + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(hg_{22}\sigma_{1}^{*})}{\partial\xi} + \frac{\partial(hg_{11}\tau_{2}^{*})}{\partial\eta} + h(\tau_{12}^{*}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta} - \sigma_{2}^{*}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi}) \right] - \frac{\tau_{s\xi} - \tau_{b\xi}}{\rho} - \frac{1}{2}C_{Dm}a_{v}hu^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \\ \frac{\partial(hv^{*})}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^{*}v^{*})}{\partial\xi} + \frac{\partial(g_{11}hv^{*2})}{\partial\eta} + h(\tau_{21}^{*}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi} - u^{*2}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta}) \right] = -\frac{hg}{g_{22}}\frac{\partial\zeta}{\partial\eta} \\ + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(hg_{22}\tau_{12}^{*})}{\partial\xi} + \frac{\partial(hg_{11}\sigma_{2}^{*})}{\partial\eta} + h(\tau_{21}^{*}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi} - \sigma_{1}^{*}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta}) \right] - \frac{\tau_{s\eta} - \tau_{b\eta}}{\rho} - \frac{1}{2}C_{Dm}a_{v}hv^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \end{aligned}$$
(3)

- v^* : η 方向の流速
- h : 水深 (=ζ-Z_b)
- ζ, Z_b: 水位および河床高。解析格子点におけ る河床高は、対象区間の横断測量また は深浅測量成果を用い、内挿して与え る。

 $\sigma_1^*, \sigma_2^*, \tau_{12}^*, \tau_{21}^*$: 水深平均 Reynolds 応力 ³⁾

$$\begin{aligned}
\sigma_{1}^{*} &= 2v_{t} \left[\frac{1}{g_{11}} \frac{\partial u^{*}}{\partial \xi} + \frac{v^{*}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} \right] \\
\sigma_{2}^{*} &= 2v_{t} \left[\frac{1}{g_{22}} \frac{\partial v^{*}}{\partial \eta} + \frac{u^{*}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \right] \\
\tau_{12}^{*} &= \tau_{21}^{*} &= v_{t} \left[\frac{1}{g_{11}} \frac{\partial v^{*}}{\partial \xi} + \frac{1}{g_{22}} \frac{\partial u^{*}}{\partial \eta} - \frac{u^{*}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \right] \\
v_{t} &= \alpha u_{*}h : \exists (fgg) & \text{Mth} \\
u_{*} &= \sqrt{\frac{\tau_{b}}{\rho}} : & & & & & \\ \# &= \sqrt{\frac{\tau_{b}}{\rho}} : & & & & & \\ \# && & & \\ t_{b\xi} : & & & & & \\ \xi & & & & \\ (fgg) &= u^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \\
\tau_{b\eta} : & & & & & \\ (fgg) &= u^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \\
\tau_{b\eta} : & & & & & \\ (fgg) &= u^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \\
\tau_{s} : & & & & & \\ \chi &= \sqrt{\frac{\tau_{pg}}{h^{1/3}}} v^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \\
\rho & & & & & \\ n : & & & & \\ r &= \frac{\pi^{2}\rho g}{\mu^{1/3}} v^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \\
\eta &= \frac{\pi^{2}\rho g}{\mu^{1/3}} v^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*$$

$$\left(=\frac{n^2 \rho g}{h^{1/3}}v^* \sqrt{u^{*2} + v^{*2}}\right)$$

 τ_s : 水面せん断力、主に風に支配される
 ρ : 水の密度
 g : 重力加速度
 n : マニング粗度係数
 C_{Dm} : 植生(高木などによる)の抗力係数
 a_v : 植生による単位体積あたりの遮蔽面積
 ξ , η : 直交曲線座標
 g_{11},g_{22} : 座標変換における係数⁴⁾

(2) 堆砂(河床変動)に関する支配方程式

貯水池堆砂、いわゆる河床変動は土砂の輸送によるもの であり、河床高(貯水池底面標高)の時間的な変化は次の 流砂の連続式を用いて表される。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda} \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (g_{22}q_{s\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (g_{11}q_{s\eta}) \right] = 0 \quad (4)$$

ここに、Z_bは河床高、λは河床材料の空隙率(砂の粒

径、形状などに依存する)、 $q_{s\xi}, q_{s\eta}$ はそれぞれ ξ, η 方向の 単位幅、単位時間あたりの体積流砂量である。

本検討では、細粒土砂を含め、砂の浮遊輸送も考慮し、 流砂量を掃流砂輸送量 *q^b* と浮遊砂輸送量 *q^{ss}* からなること とする。極めて細い粘土から砂成分まで、またはそれ以上 の土砂が存在するため、解析では混合砂としてそれぞれの 粒径毎の流砂量を求め、その合計をとる。

ダム貯水池においては、中央の水深の深い領域(最大水 深18m)で流速が極めて遅くなるため、掃流砂輸送は無視 できるほど小さいが、河川流入部ではこれを考慮する必要 がある。一方、水深の深い領域では、Washload として輸 送される細粒土砂(主に粘土、シルト)による堆積が支配 的であり、浮遊砂輸送は無視できない。

掃流砂輸送量*q*_bおよびその輸送方向は、局所的な河床勾 配および流線湾曲による二次流の影響を考慮し、芦田・道 上式に準じて求める⁵⁾。この流砂量式は有効掃流力を考慮 して掃流砂量を推算することとしている。

浮遊砂輸送量 q_{ss} は浮遊砂濃度と流速の水深積分で求ま る。浮遊砂の場合、河床変動は沈降量と巻き上げ(再浮上) 量の差によって発生する。流れが速く巻き上げが優勢とな るとき、河床侵食が生じ、逆に沈降が支配的となるとき、 堆積が生じる。巻き上げられた浮遊砂は移流と拡散によっ て横断方向に広がる。水深平均の浮遊砂濃度は式(5)の浮遊 砂質量保存式(移流拡散式)で解析することができる。

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial (g_{22}h_u^{-}C)}{\partial \xi} + \frac{\partial (g_{11}hv^{-}C)}{\partial \eta} \right]$$
$$= \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{22}}{g_{11}} hD_C \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11}}{g_{22}} hD_C \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \right] \quad (5)$$
$$+ \left(\not \cong \bot q_{su} - \dot{\chi} \not \boxtimes \omega_k C_b \right) \right|_{hed}$$

ここに、Cは水深平均、 C_b は河床近傍の浮遊砂体積濃 度(SS 濃度)、 q_{su} は河床面から砂粒子の巻き上げによる 浮上量、 ω_k は粒径 d_k の砂の沈降速度、 S_C は浮遊砂の Source/sink、 D_C は拡散係数($D_C = v_t/\sigma_t$)、 σ_t (≈0.9)は 乱流拡散 Schmidt/Prandtl 数である。混合砂の場合、それ ぞれの粒径に対して、式(5)を用いて、各粒径毎の浮遊砂濃 度を解析する。 ω_k は van Rijn の式⁶⁾を用いる。

河床面からの砂の浮上量 q_{su} の計算式としては、いくつ かの経験式が提案されている。河床が平衡状態にあるとき、 河床の単位面積から単位時間に巻き上げられる粒子群の体 積 q_{su} (単位:m³/m²·s)は、単位面積当たり単位時間に 河床へ沈降する粒子群の体積 $\omega_k C_{beq}$ に等しいため、 $q_{su} = \omega_k C_{beq}$ が成り立つ。 C_{beq} は基準点 Z_{Cb} での理論的な平 衡濃度であり、経験式によって計算する。例えば、本研究 では、板倉・岸の式により計算した⁷。

Washload 濃度の移流・拡散式は式(5)と同じであるが、 細粒土砂の巻き上げ(再浮上)量 *q*_{su} は汎用性の高い理論 または経験式がないため、特別に配慮する必要がある。本 モデルでは、粗粒分の浮上量に応じて、河床材料中の細粒 分の存在割合で細粒土砂の浮上量を計算することとした。

河床近傍の実際の浮遊砂濃度*C*_bは水深平均濃度*C*の関数で表す⁸⁾。単位面積・単位時間当たりの砂の浮遊運動による河床変動の計算においては以下の式が成り立つ。

 $\frac{\partial Z_b}{\partial t}$ $\frac{\partial D_b}{\partial t}$ $\frac{\partial D_b}{\partial t}$

河床低下) =
$$\frac{1}{1-\lambda}(\omega_k C_b - q_{su})$$
 (6)

したがって、掃流砂とともに浮遊輸送が存在する場合の 河床変動に関する支配方程式は式(7)に変形することがで きる。

$$\frac{\partial Z_{b}}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda} \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (g_{22}q_{b\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (g_{11}q_{b\eta}) \right]$$

$$= -\frac{1}{1 - \lambda} (q_{su} - \omega_{k}C_{b})$$
(7)

ダム貯水池堆砂解析は混合砂を対象とするため、粒度分 布を幾つかの粒径に分けて解析を行う。上式の掃流砂量お よび浮遊砂の巻き上げ量と濃度は、細粒土砂に対して粗粒 土砂の遮蔽作用を考慮したうえで各粒径毎の合計をとる。 また、交換層における粒径階*d*_kの含有率(存在割合) *p*_{bk} を当該粒径階の砂礫の質量保存則により求める。

(3) 初期条件および境界条件

流れ解析の初期条件として、各計算点における水位(水 深)は貯水池水位を基にして設定し、初期流速はゼロと仮 定する。発電、Spillwayからの放流を考慮し、上流端およ び各支川の流入部において計算開始時の流量を与えて流れ 解析を実施し、各計算点の水位および流速の初期値計算を 行う。

また、河床の初期条件としては、各計算点において実測 の河床高および粒度分布を与える。

流れの境界条件として、上流端および各支川の流入部に おいて流入流量時系列、下流端(ダム)においてダム Spillway部と発電取水口に放流量時系列を与える。

流砂の境界条件として、境界点の掃流砂量は、掃流力の 計算値より求めた平衡掃流砂量を河床の粒度分布にあわせ て与える。細粒分を含む浮遊砂量は、観測値をベースにし た支川ごとの浮遊砂量~流量相関式を用いて算出し、観測 から得られた浮遊砂の平均粒度分布で分級して与える。

発電放流の土砂濃度は、取水口地点の水深平均の計算濃 度から経験式で河床近傍の濃度を求めて与える。Spillway からの放流濃度は水深平均濃度とする。放流土砂の粒度分 布は、観測から得られた浮遊砂の平均粒度分布で分級して 与える。

(4) 解析スキーム

流速と水位、河床高、土砂濃度、流砂量変数をスタッガ ード格子上に配列し、有限体積法に基づいて解析を行う。 空間微分項の離散では、移流項、Reynolds 応力項に Power Law スキーム⁹⁾を、その他の項に中心差分を適用する。時 間微分項には、陰形式のスキームを用いる。

計算の手順は以下のとおりである。

- 運動量式(2)、(3)と水の連続式(1)を結合することに より水位を求める。
- ② 水位の計算結果をもとに運動量式(2)、(3)により流速の解析を実施する。
- ③ 水理量をベースに掃流砂量を算出する。
- ④ 巻き上げ(再浮上)量を評価し、式(5)で流砂の水深 平均濃度(SS 濃度)、そして河床近傍濃度を算出す る。
- ⑤ 河床材料の連続式(7)により河床高の変化(堆砂高) を求める。
- ⑥ 各粒径 *d_k* 毎の質量保存則によりその含有率 *p_{bk}* の変 化を計算する。

以上の手順を繰り返して解析を進め、水位、流速、堆砂 分布(河床高変動量)、SS 濃度、粒度変化、特定地点の 通過土砂量、ダムからの排出土砂量、貯水池土砂捕捉率な どが得られる。

3. ウォノギリダム貯水池堆砂(2004~2005年)の再現

インドネシア国ウォノギリ (Wonogiri) 多目的ダム貯水 池は、湛水面積 88km²、貯水容量 7.3×10⁸ m³、ダム集水面 積 1,262km² (貯水池湛水面積を除く) で、ジャワ島最大 の河川—ソロ (Solo) 川流域で唯一の大規模貯水池であり、 1980 年に完成した。地域特有の気象と土壌の特徴に加え、 過度な土地利用により、流域から土砂の流入量が計画の約 3~4 倍に達している。そのため、ダム堆砂が急激に進み、 貯水池機能が低下する恐れが出てきている。前述したよう に 2004 年 7 月より 3 年間の予定で、ウォノギリダム貯水 池の堆砂対策計画調査 (発注者: JICA) が実施され、今現 在進行中である。

(1) 現地観測

堆砂対策計画調査において、貯水池内堆砂量およびその 分布を把握するため、雨季前の 2004 年 10 月と雨季後の 2005 年 7 月に貯水池深浅測量を行った。2004 年 10 月の 調査では同時に貯水池内 12 箇所でボーリング調査を実施 し、河床材料の粒度分布も分析した。図-1 は代表地点(ボ ーリング位置は図-3 に示す)の粒度分布である。貯水池 中央部において、河床材料の平均粒径 d_mは 0.005mm 程度 であり、非常に細かいことが判った。

乾季の貯水池流入土砂量は極めてわずかであると考え

られるため、上述の雨季前後の深浅測量結果から、2004~2005年の一年間の貯水池堆砂量は堆積土砂体積ベースで231.7万m³相当であると判断した。なお、貯水池堆砂の乾燥密度の平均値は1064kg/m³であり、土粒子の密度の平均値は2650kg/m³である。





また、ダム主要支川の流入流量および土砂量を把握する ため、2004年11月下旬から2005年5月中旬までの期間 に、各主要河川の時間流量観測および流入土砂濃度の観測 を実施した。同時に、サンプリング採水で流入土砂の粒度 分布を分析した。

図-2 に総流入流量ハイドロを示す。2004年~2005年 雨季において、最大洪水は2004年12月3日に発生し、総 流入洪水のピーク流量は約1330m³/s であった。現地観測 の詳細は当調査のレポートを参照されたい¹⁰。



図-2 総流入流量ハイドロ(2004年11月~2005年5月)

(2) 解析領域および入力条件

解析領域は、6 つの主要流入河川のダム貯水池背水末端 までを含め、貯水池設計洪水位 138.3m にほぼ相当する地 形図コンター137.5m 範囲の全域とした。河川の河岸境界 およびダム構造物に合った境界適合型直交曲線メッシュを 図-3に示す。メッシュサイズは 3~330m、総メッシュ数 は約 3700 である。効率的に解析を行うために、河川部お よびダム近傍領域に細かいメッシュを、その他特に貯水池 中央領域に最大サイズ約 330m の粗いメッシュを設置し た。



図-3 ウォノギリ貯水池、標高 137.5m 水面範囲(赤線)および直交曲線解析メッシュ

シミュレーションにおいて、入力条件は、貯水池初期水 位、初期河床高、河床材料粒度分布、流入流量ハイドロ、 流入土砂(SS)濃度とその粒度分布、発電と Spillway か らの放流流量、ダム貯水池水面の蒸発と直接降雨などであ る。貯水池水面が広いため、水面での直接蒸発と降雨は貯 水池水量のバランスにおいて無視できない。また、河床材料 について、混合粒径土砂(0.001~19mm)は9分割して解 析を行うものとした。

2004年の測量ベースによる貯水池の水位・体積(H-V)、 水位・面積(H-A)関係を図-4に示す。同図に解析に設定 した初期河床ベースでのH-V、H-Aデータも示した。図-4に示すとおり、解析の初期河床設定は測量地形と一致す



図-4 2004.10 測量の貯水池 H-A、H-V と解析の設定値

(3) 河川からの流入土砂濃度の推定

解析の入力条件のうち河川から流入する浮遊土砂 (Washload)濃度は流入流量の関数で表されるものとし、 下記関数で与える。

 $Q_s = a \cdot Q^b \tag{8}$

ここで、 Q_s 、Qはそれぞれ浮遊砂量(堆砂体積ベース、 m³/s)、流量(m³/s)である。a、bは係数であるが、流 入河川ごとに異なる。本解析では貯水池堆積土砂量および 粒度分布、洪水流観データ(流入および放流流量、浮遊砂 濃度、粒度)を用いて決めることとした。

2004年10月~2005年7月間の観測結果から、貯水池 から排出された土砂量を堆砂体積ベースで135,000m³と 推定した。したがって、前述の深浅測量結果から得られた 貯水池堆砂量と合わせて、2004年10月~2005年7月間 の貯水池に流入した土砂総量は約245.2万m³であった。 河川ごとに式(8)の係数a、bを決定するため、上記の堆 砂実績を領域別に区分し、2次元堆砂解析モデルでの予備 計算を行い、最終的に各河川の係数と流入土砂量(浮遊砂 量)を表-1に示す値に同定した。流入河川のうち、 Keduang川の流入土砂流量~流量の観測データ、その相関 曲線(係数a、bは表-1を参照)を図-5に示す。

2004年11月23日~2005年5月15日間の流入土砂量 (浮遊砂量)は2004年10月~2005年7月間の実績流入土 砂量(堆砂と放流土砂量の実績から推定)より6万m³ほ ど少なく、239.0万m³(堆砂体積ベース)であった。

River	а	b	Sediment Inflow during 2004.11.23-2005.5.15 (deposition volume, m ³)
Keduang	0.0002656	1.601	811,000
Tirtomoyo	0.0003967	1.477	409,000
Temon	0.0005219	1.522	85,000
Solo	0.0010536	1.388	506,000
Alang	0.0003738	1.628	335,000
Wuryantoro	0.0004875	1.628	246,000
Total			2,390,000

表-1 各流入河川の流入土砂量~流量相関式の係数



(4) 再現シミュレーションの結果

上記実測データおよび流入土砂量~流量相関式の推定 値(式)を用い、2004~2005年雨季のウォノギリダム貯 水池堆砂の再現解析を行った。解析から得られた水位、SS 濃度、堆砂量および粒度分布、放流土砂量などを観測結果 と比較し、解析の再現性を検証する。

1) 水位

貯水池水位の観測値(1 点鎖線)とモデルの計算結果(実 線)を図-6に示す。時期によって数 cm、最大 10cm 程度 の開きがあるものの、解析結果は観測値とよく一致した。 その差は貯水池水面の高い雨季の後期でも 5cm 以内とな っている。数 cm の差が存在する原因としては、解析モデ ルの地形設定に若干誤差があることと、長期間解析の累積 誤差によるものと推測される。

工学的な観点から、長期間解析として、本解析の貯水池 水位計算について精度は高いと判断する。

2) 発電放流水の土砂(SS) 濃度

発電放流土砂濃度の解析値と観測値の比較を図-7に示 す。時間のズレがあるものの、発電放流土砂 SS 濃度の解 析結果は観測値とほぼ一致する。流入洪水ハイドロの一部 を貯水池水位変化から逆算したことが、時間ズレの原因の 一つとして考えられる。



図-7 発電取水口位置の SS 濃度変化

写真-1 洪水時濁水流入の様子

3) 貯水池内 SS 濃度および堆砂分布

図-8に洪水時の浮遊砂 SS 濃度、図-9に洪水ピーク時 (2004 年 12 月 3 日)の流速コンターを示す。洪水ピーク 時においても、貯水池中央では流速が 1cm/s 以下と遅かっ た。また、洪水時 Keduang 川から貯水池中央へ向かって 逆流が生じた。この現象は洪水時の写真(写真-1)に示さ れた濁水流入の様子と一致する。SS 濃度分布の図-8 か ら、浮遊土砂の輸送は洪水時の流れに直接影響を受けたこ とが判る。洪水時、河川流入部で SS 濃度が高いが、貯水 池中央では流れが遅いため、SS 濃度が低かった。また、 Keduang 川からの流入土砂は貯水池中央までにも流送さ れた。ダム直上流に流入する河川以外の流入土砂はダム付 近にほとんど到達せず、排砂のハード対策はダム近傍に流 入する河川を中心に実施すべきことが示唆される。

図-10 に 2005 年 5 月 15 日時点(雨季後とみなす)の 河床高変化(堆砂高)の計算結果を示す。貯水池内の堆砂 は各河川の貯水池流入部から中央へ向って進行することが 伺える。河川流入部に約 10~30cm 程度の堆積が生じたが、 貯水池中央部の堆積は 2cm 程度かそれ以下に止まった。

領域別(図-3)の2004年~2005年雨季堆積土砂量の 測量結果(2004年10月~2005年7月)を表-2に、解析 結果(2004年11月23日~2005年5月15日)を表-3 に整理した。表中の Keduang における堆砂量は図-3の Keduang エリアと Dam エリアの堆砂量を合計したもので ある。

総堆砂量について、解析期間が測量の期間間隔よりも若 干短いため、測量結果の231.7万m³に対して解析結果は 225.5万m³であるが、表-2と表-3の比較に示されるよ うに、領域別にみても、堆砂量および分布の解析結果は測 量結果とほぼ一致していることが判る。

領域別堆積土砂粒度分布の解析結果と実測値との比較 を図-11に示す。なお、領域ごとの堆積土砂の粒度分布は 計算結果の平均値であり、測量結果は領域内のボーリング 調査地点粒度分布の単純平均である。堆積土砂粒度分布に ついても解析結果は実測とほぼ同じ分布を示した。Center エリアでは実測値に元河床の若干粗い粒度成分も含まれて いたため(堆砂層が薄い)、解析結果の粗い成分は実測値 とズレがある。

以上の比較で、貯水池内堆砂量、堆砂分布および粒度分 布の解析結果は実測値と良好に一致したことが判明した。 また、発電放流土砂量、濃度およびその時間変化などにつ いても定量的に扱えることが検証された。したがって、推 定した流入土砂量関係式は合理的であるとともに、提案し た平面2次元移動床解析モデル—NKhydro2Dモデルはウ オノギリ多目的ダム貯水池の堆砂シミュレーションに適用 できることが確認された。

図-6 貯水池水位の観測記録および計算結果

図-8 洪水時貯水池内 SS 濃度分布 (赤いほど高濃度)

図-10 2004年雨季貯水池堆砂分布(赤いほど堆砂が多い)

図-9 洪水ピーク時流速コンター (赤いほど速い)

表-2 2004年10月~2005年7月の領域別堆積土砂量の測 量結果(堆砂体積ベース、m³)

Area	Sedimentation Volume (m3)	Sediment Distribution(%)								
		d=	0.0013-	0.005-	0.016-	0.031-	0.075-	0.25-	0.85-	2.0-
		0.0013mm	0.005mm	0.016mm	0.031mm	0.075mm	0.25mm	0.85mm	2.0mm	19.0mm
Keduang	711,500	58.01	6.22	8.97	7.00	8.77	9.22	1.69	0.12	0.00
Tirtomoyo	304,500	51.74	3.20	5.20	3.92	6.35	10.82	14.22	4.18	0.38
Temon	98,600	61.33	5.97	10.17	6.20	9.41	6.33	0.37	0.21	0.00
Solo&Alang	400,300	63.47	4.49	10.65	7.86	8.52	4.04	0.74	0.23	0.00
CenterUP+	471,800	56.43	4.23	9.03	5.45	8.39	10.51	4.39	1.33	0.24
Wuryantoro3										
Center	208,300	79.75	3.47	3.49	1.77	3.32	4.45	2.08	1.40	0.28
Wuryantoro	96,000	unknowr	1							
Wuryantoro2	25,800	unknowr	1							
Total	2,316,800									

表-3 2004年11月~2005年5月の領域別堆積土砂量の解 析結果(堆砂ベース、m³)

	Sedimentatio	Sediment Distribution (%)								
Area	n Volume	d=	0.0013-	0.005-	0.016-	0.031-	0.075-	0.25-	0.85-	2.0-
	(m3)	0.0013mm	0.005mm	0.016mm	0.031mm	0.075mm	0.25mm	0.85mm	2.0mm	19.0mm
Keduang	668,100	59.87	5.55	10.59	8.48	7.00	6.33	2.05	0.15	0.00
Tirtomoyo	300,800	50.23	6.14	8.04	8.82	8.12	8.72	6.69	2.79	0.46
Temon	120,200	63.49	7.06	9.78	6.31	7.74	4.73	0.78	0.12	0.00
Solo&Alang	396,800	58.42	6.06	11.73	8.16	8.48	5.01	1.89	0.25	0.00
CenterUP+	447 200	52.11	4.84	15.85	11.40	9.32	3.59	2.15	0.63	0.11
Wuryantoro3	447,300									
Center	202,500	80.40	9.00	9.38	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wuryantoro	93,800	53.91	4.59	6.66	6.04	8.38	11.01	7.00	2.04	0.37
Wuryantoro2	25,400	56.17	4.81	6.63	5.63	7.79	10.23	6.50	1.90	0.34
Total	2 254 900									

(c) Solo&Alang エリア

図-11 堆積土砂粒度分布の実測および計算結果

4. 1993~2004 年の貯水池堆砂の再現

表-1 中の係数 a、b 値を与えた流入土砂量~流量相関 式を 1993 年からの流入土砂条件に適用し、提案モデルで ウォノギリ多目的ダム貯水池の 1993 年から 2004 年まで 11 年間の堆砂再現シミュレーションを行った。

11年間に流入した土砂総量は約3,520万m³で、年平均 約320万m³であった。豊水年の1993年、1998年および 1999年では、年間の流入土砂量は400万m³以上で、Spillway および発電放流土砂量も70万m³程度であった。一方、渇 水年の1996年および2003年では、年間の流入土砂量は200 万m³以下であり、Spillwayからの放流はなく、発電によ る放流土砂量のみでそれぞれ15万m³、7万m³であった。

各河川の流入流量ハイドロは降雨、蒸発、貯水池水位観 測および放流記録に基づき、流出解析で作成した。貯水池 水位観測精度が低く、その他情報が少ないため、流入流量 の波形および到達時間の推定誤差は大きいと考えられる。 1993 年~2004 年の 11 年間のうち、1998 年の総流入水量 が約 15 億 m³ (貯水池水面降雨を含む)で最も多く、一方、 1996 年の総流入水量が約 8 億 m³程度で最も少なく、年間 の流入流量の差が大きい。発電取水による放流流量および Spillway の放流量はダム放流記録を用いた。初期河床高 は、1993 年に測量した貯水池断面データを基に作成した。 河床材料は 2004 年 10 月の調査データを用いて設定した。

1993年~2004年の間、それぞれ 1993年からの累積河 床変動高(堆砂高)を図-12に示す。貯水池内の堆砂は各 河川の貯水池流入部から中央に向けて進行したことが判 る。11年間に、発電取水口(Intake)のまわりに 1m ない し 2m 程度の土砂堆積が生じた。一方、貯水池中央領域に おける土砂堆積は少なく、堆積のもっとも少ない場所では 10cm 程度に止まった。

11 年間に貯水池内に堆積した土砂総量の解析結果は 2,984万m³で、年平均では約271万m³となる。ダムから の放流土砂総量は、Spillway 放流約186万m³、発電放流約 296万m³で合計約482万m³であり、年平均では約44万 m³であった。貯水池の平均土砂捕捉率は約0.85であるが、 豊水年の土砂捕捉率は低く、渇水年は高い傾向が見られた。 今回の計算結果により、11年間のウォノギリダムの年平均 堆砂量、年平均放流土砂量ならびに貯水池捕捉率を、統計 的に分析することが可能となり、現在、これらを計画の基 本諸元として堆砂対策マスタープランを検討中である。

一方、推定実績堆砂総量は約3,231万m³、年平均堆積 土砂量は約294万m³であった。解析結果とこの推定実績 値との差は総量において約247万m³、年平均で約22.5万 m³であり、約8%弱の誤差がある。これはシミュレーショ ンの誤差であると考えられるが、実測堆積土砂量の推定に 使用した1993年測量の断面データでは、断面間隔が1km かそれ以上と広かったため、また、ダム直上流の領域にお いて測量断面がまったくなかったため、推定した堆積土砂 量に誤差が含まれていることや、流入流量の解析条件の推 定誤差などによる影響も大きいものと考えられる。

再現計算結果により、総合的な観点から、シミュレーションの結果は実測と概ね一致したと評価できる。したがって、2004~2005年雨季の観測データをベースに推定した 流入土砂量関係式を1993年からの流入にも適用できることを確認した。このことから、今後の予測および堆砂対策の解析にも適用できるものと判断する。

(a) Sedimentation in 1993-1994

(b) Sedimentation in 1993-1996

(c) Sedimentation in 1993-1998

(d) Sedimentation in 1993-2000
 (e) Sedimentation in 1993-2002
 (d) Sedimentation in 1993-2004
 図-12 1993 年からの河床高変動量(堆砂高)コンターの計算結果(単位:m)

5. おわりに

貯水池堆砂の予測では、本検証で説明されたように、河 床変動計算を基本とする移動床水理数値解析モデルが有効 である。本研究においては、境界適合直交曲線座標系をベ ースにした水深平均の平面2次元移動床水理解析モデルー NKhydro2D モデルを提案した。掃流砂とともに浮遊砂 (Washload 含む)輸送も考慮し、細粒土砂の巻き上げ(再 浮上)量については、粗粒分の浮上量に応じて、河床材料 の細粒分存在割合で細粒土砂の浮上量を計算した。同モデ ルを用いて、インドネシア国ウォノギリ多目的ダム貯水池 の堆砂シミュレーションを実施した。 先ず、実際の貯水池堆積土砂分布、放流土砂量、洪水流 量と流砂量観測値および支川ごとの流入流量ハイドロをも とに2004年~2005年雨季期間の流入土砂総量および支川 ごとの流入土砂量と粒度分布を推定し、2004年11月23 日~2005年5月15日雨季期間中のウォノギリダム貯水池 堆砂の再現シミュレーションを行った。貯水池水位、流速 分布、浮遊砂 SS 濃度分布、貯水池内堆砂量および粒度分 布、発電放流土砂量、濃度およびその時間変化などの解析 結果は実測値と良好に一致した。この検証シミュレーショ ンにより、推定した流入土砂量関係式が合理的であること と、NKhydro2D モデルがウォノギリダムの堆砂シミュレ ーションに適用できることを確認した。

次に、2004~2005 年雨季の観測データをベースに推定 した流入土砂量関係式を 1993 年からの流入にも適用し、 1993 年から 2004 年まで 11 年間の堆砂再現シミュレーシ ョンを行った。シミュレーションの堆積結果は推定した実 測値と比較的良く一致し、推定した流入土砂量関係式を 1993 年からの流入にも適用できることから、今後の予測お よび堆砂対策の解析にも適用可能と判断する。

SS濃度分布の解析結果から、洪水時にはKeduang川(ダ ム直上流の右岸側に流入している)から貯水池中央へ向っ て逆流が生じていることが判る。貯水池中央では流速が 1cm/s以下と遅いため、SS濃度が低く、堆砂は少ない。ダ ム直上流に流入する河川以外の流入土砂はダム付近にほと んど到達せず、排砂のハード対策はダム近傍に流入する河 川を中心に実施すべきことが示唆される。

現在、本モデルを用い、堆砂分布、放流土砂量および濃 度変化などを解析することで、ダム右岸側に排砂ゲートの 新設、土砂バイパス、貯水池分離運用などの堆砂対策案の 排砂効果(排砂量と必要放流量の関係)を検討中である。

謝辞:本研究内容は国際協力機構(JICA)より受注した業務-インドネシア国ウォノギリ多目的ダム貯水池堆砂対策計画調査の結果に基づくものである。当調査に関し、種々の御協力・御助言をいただいた JICA 関係者、国内支援委員会およびインドネシア側の業務運営委員会、その他関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 鈴木 伴征、柏井 条介、吉岡 喜浩:鯖石川ダム堆砂実績 を用いた粒径別流入土砂量の推定、ダム工学、Vol.14、No.4、 pp.257-269、2004.
- 2) 金 海生、佐々木 成人、山田 裕康:急流扇状地河川の河 床変動および河岸侵食のシミュレーション、こうえいフォー ラム、No.12、2004.
- Rodi, W.: Turbulence models and their application in hydraulics, IAHR Publication, DELFT, The Netherlands, 1980.
- Thompson, Joe F., Warsi, Z.U.A., Mastin, C.W.:: Numerical Grid Generation — foundations and applications, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, 1985.
- 5) 芦田和男、道上正規:混合砂礫床の河床変動に関する研究、 京大防災研究所年報、 No.14(B)、1971.
- Van Rijn, L.C.: Mathematical modelling of suspended sediment in non-uniform flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110, No.11, 1984.
- 7) 土木学会:平成 11 年度版水理公式集、p.167、1999 年 11
 月

- 8) 金 海生、千田 健一、佐々木 成人、山田 裕康:河口土 砂流検討に平面2次元移動床解析モデル—NKhydro2Dモデ ルの適用、こうえいフォーラム、No.13、2005.
- Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 10) Japan International Cooperation Agency (JICA): The study on countermeasures for sedimentation in the Wonogiri multipurpose dam reservoir in the Republic of Indonesia, Interim Report, June 2006.