

◆特集：既設ダム有効利用のための技術開発◆

粒径を考慮した貯水池堆砂の予測手法

櫻井寿之* 箱石憲昭** 柏井条介***

1. はじめに

既設ダムを有効利用する上での課題の一つとして堆砂の問題が挙げられる。通常、貯水池では、100年間の土砂流入を見込んで、計画堆砂容量を設定しており、その上に利用するための有効容量を確保しているため、堆砂の進行が予測どおりであれば、100年間はその機能を活用できることになる。しかし、予想以上の土砂流入が生じる場合や、計画上、貯水池内に水平に確保されている堆砂容量に対して、実際の堆砂が傾斜して堆積する場合などは、堆砂によって有効容量が減少する。ダム堤体そのものの寿命は非常に長いものと考えられ、堆砂問題を解決すれば、貯水池は100年以上の長期にわたって有効に活用することが可能となる。

そこで、貯水池における堆砂対策が求められることになる。堆砂対策については、古くから研究が始められ、様々な手法が確立されてきており、現在でも精力的な研究により新たな手法が提案されつつある。

堆砂対策を検討する上で、それぞれの手法の効果と経済性を考慮する必要がある。堆砂現象を予測するツールが不可欠である。堆砂現象については、土砂の粒径の大小によって、貯水池内での挙動が大きく異なるため、精度の良い予測を行うためには、粒径を考慮した検討が必要となる。しかしながら、従来、貯水池に流入する土砂量を粒径毎に精度良く推定することが困難であり、予測モデルの精度が明確ではなかった。

そこで、本稿では、土木研究所で検討を行ってきた既設ダムの堆砂データを用いて粒径別の流入土砂量を精度良く推定する手法、堆砂予測のための混合粒径1次元河床変動モデルの概要とその再現性の検証事例を、実際に予測計算を行う上での留意事項を含めて紹介する。

2. 粒径別流入土砂量の推定方法

堆砂予測計算において、上流端の与条件として必要な流砂量（流入土砂量）は、結果に及ぼす影響が大きく、最も設定が困難な境界条件である。この条件を精度良く設定できるかどうかは再現結果の精度を大きく左右することになる。これまでの堆砂実績のデータがあるダムでは、そのデータを利用して精度の良い流入土砂量を推定することができる。推定方法の詳細の説明は参考文献¹⁾にゆずるが、概略を以下に示す。

はじめに、ボーリング調査等から堆積土砂の粒径の空間分布を明らかにし、堆積土砂の特性を考慮して代表粒径を設定する。次に、各年の堆砂横断測量結果と堆砂のボーリング調査結果を用いて、設定した粒径区分について、粒径別の各年の年堆砂量を算定する。次に、流入土砂量を、次式を用いて流量の関数で表す。

$$Q_{sj} = \alpha_j Q^{\beta_j} \quad (Q > Q_{sj}) \quad (1)$$

ここで、 Q_{sj} ：粒径 j の流砂量、 Q ：流量、 α_j 、 β_j ：粒径毎のパラメータ、 Q_{sj} ：粒径毎の土砂流入が生じる限界流量を表す。前述の粒径別年堆砂量のデータを用いて、粒径毎のパラメータ α_j 、 β_j 及び Q_{sj} を同定する。なお、このとき、貯水池に全量捕捉されない粒径については、捕捉率を考慮する必要がある。

堆砂実績データの少ないまたは無い貯水池については、精度の良い流入土砂量の条件を設定することは難しいが、近傍の土砂生産特性が類似している貯水池のデータを用いたり、流砂量式を用い

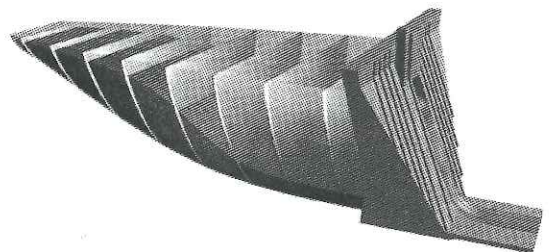


図-1 1次元河床変動モデルのイメージ

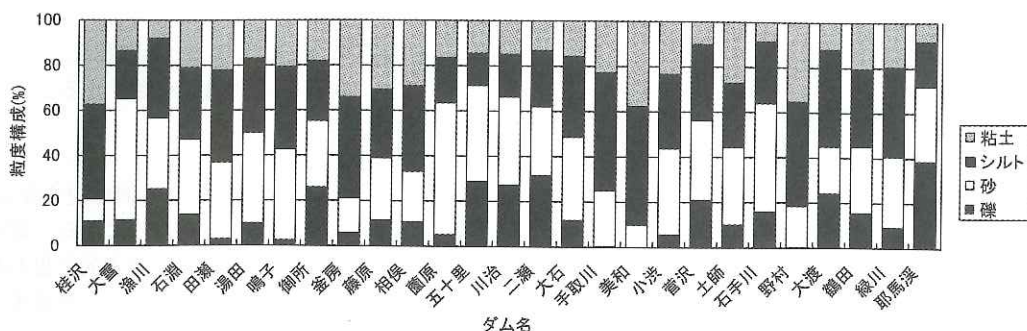


図-2 堆砂の粒度構成

たり、検討内容に応じてある程度幅を持たせた条件を複数設定して検討すること等が考えられる。

3. 堆砂予測モデルの概要

堆砂予測では、通常、数十年から100年程度の長期間の予測が必要とされる。そのため、計算負荷の小さい1次元の河床変動モデルが用いられる場合が多く、筆者らも1次元モデルの開発を行っている(図-1参照)。1次元モデルによる計算では、水位や河床高(堆砂高)は横断面内で一様と仮定されているため、貯水池幅が広い場合など、断面内で河床高が一様でない場合には、適用に問題があるが、長期間の土砂収支の概要を把握する目的においては有用であろう。また、日本では、河道型の流下方向に細長い形状の貯水池が多く、1次元モデルが適用できる場合が多いと考えられる。

貯水池の堆砂予測計算に必要と考えられる条件を以下に示す。①堆砂中には粘土、シルトから礫まで多様な粒径が存在しており、混合粒径で計算する必要がある(図-2参照)。②貯水池は流域の上流部に位置する場合が多く、ダム建設前の河床勾配は比較的急で、流入河川の流れが射流であったり、水位低下時に、堆砂肩の下流で射流が生じたりするため、常流と射流が混在する流れを再現する必要がある。③流入河川から貯水池にかけては、水深および流水断面積が大きく変化し、これに伴って掃流力が大きく変化し、浮遊砂の浮上量と沈降量の差が大きくなるため、浮遊砂輸送の非平衡性を考慮する必要がある。④複数の河川が流入する貯水池では、合流を取扱う必要がある。⑤粘土、シルトといった微細粒子土砂は堆積すると粘着性を持ち、侵食(再浮上)する場合にその侵食特性を考慮する必要がある。

上述の求められる条件に対して、構築したモデルの概要を以下に示す。

シミュレーションモデルは混合粒径を取り扱え

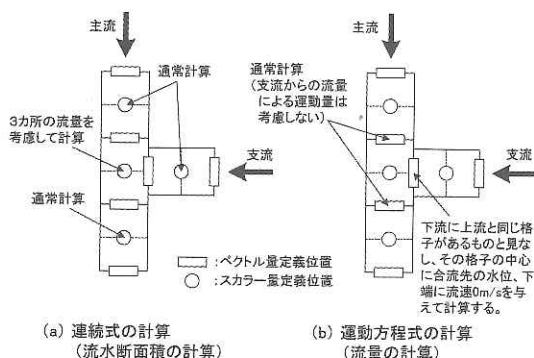


図-3 合流部接続モデルの概要

る非定常(不定流)の1次元河床変動モデルとし、基礎方程式は1次元の流れの連続式、流れの運動方程式、流砂の連続式、浮遊砂の粒径別輸送方程式および交換層内の粒径別土砂収支式から構成されている。浮遊砂の輸送方程式を用いることで浮遊砂の浮上と沈降の非平衡性を考慮している。式の詳細は文献を参照していただきたい²⁾。

数値解析法については、基礎方程式の各変数をスタッガード格子に配置し、非定常項についてはオイラー陽解法、空間については有限体積法により離散化した。移流項の離散化には1次精度風上差分を用いている。この手法により、1次元の水面形計算において常流と射流の混在する流れを計算可能なことが確認されている³⁾。

掃流砂の算定には芦田・道上の流砂量式⁴⁾を用い、浮遊砂の非平衡性の取扱いでは清水ら⁵⁾、井上ら⁶⁾を参考にしており、浮遊砂の基準面濃度の算定には芦田・道上⁷⁾の式を用いている。

合流のモデル化については、アルゴリズムをシンプルにすることおよび計算を安定させることを考慮して、図-3に示すような単純な手法で水路を接続している。

微細粒子土砂の侵食(再浮上)については、下記の、関根⁸⁾の提案した式を用いて侵食速度を評

価してモデル化を行った。

$$E = \alpha_E u_*^{\beta_E} \quad (u_* > u_{*CE}) \quad (2)$$

ここで、 E : 侵食速度 (m/s)、 u_{*E} : 侵食限界摩擦速度 (m/s)、 u_* : 摩擦速度 (m/s)、 α_E 、 β_E : 定数を表す (α_E は β_E の値に応じた次元を持ち、例えば β_E が 3 の場合 s^2/m^2 の単位を有する)。定数については、対象とする貯水池の土砂を用いた侵食実験の結果から設定を行っている²⁾。

4. 境界条件・計算条件の設定方法

堆砂予測計算に必要とされる上流端及び下流端の境界条件は、流量、流砂量、水位である。土木研究所で開発しているモデルでは、上流端の流量と流砂量および下流端の水位が入力に必要な条件であり、上流端の水位および下流端の流量、流砂量は計算結果として出力されることになる。

上流端の流砂量の条件設定については、2章に示した。流量や水位の条件については、既存の観測データを用いることになるが、留意する事項として、値の変化が小さい期間は日間隔のデータを用いればよいが、土砂移動に大きな影響を与えるような出水時や水位低下操作時には、時間間隔のデータを用いることが望ましい。また、異常値や現実的でない急激な変化をしているデータについては、安定した計算ができない可能性があるため、事前にチェックして、補正およびスムージング等の処理を行っておく必要がある。

次に、堆砂予測計算における主要な計算条件の設定方法について示す。いわゆる計算のノウハウのような事項は、あまり報告されることはないが、実務上は重要な情報と考えられる。そこで、ここで示す内容は、筆者らの経験によるところが大きく、論理的でない内容も含まれるが、記述したい。情報・ご意見等があればお寄せ頂き、より良い条件の設定方法を見いだしていけたら幸いである。

4.1 計算時間間隔

値が大きいほど計算に要する時間は短くなるが、計算は不安定になりやすい。また、計算格子間隔が大きいほど計算時間間隔を大きく設定しても計算を安定して行うことができる。目安として、60mの空間格子で最大流量が $120m^3/s$ 程度の場合で2秒、200mの空間格子で最大流量が $100m^3/s$ の場合で6秒とした事例があるが、各計算対象に応じて試行錯誤的に決定する必要がある。計算負荷を少なくするために、流量や水位の変動が大きい

ような計算が不安定になりやすい期間についてピンポイントで計算時間間隔を小さくすることも考えられる。

4.2 計算格子間隔

値が大きいほど計算に要する時間は短くなるが、結果の空間分解能は粗くなることになる。貯水池の場合、数十m～数百m程度が現実的と思われるが、検討目的や計算負荷量を考慮して決定する必要がある。

4.3 代表粒径

代表粒径の数が少ないほど計算に要する時間は短くなる。既存の検討例では、6～20程度の代表粒径数が用いられている。検討対象となる堆砂の粒度分布を調べて、検討目的を考慮しつつ、堆砂の主要な粒度構成を適切に表現できる代表粒径を設定する必要がある。

4.4 地形データ

堆砂計算のための1次元河床変動計算モデルでは、土砂移動の生じない基岩の地形データを作成する必要がある。このとき、下流端はダム堤体まで、上流端は対象とする期間で、流入河川において貯水位による背水や背砂の影響を受けない範囲までの領域のデータを作成する。各計算格子位置の横断面形状の標高と幅のデータを作成するが、極端に細い幅が存在すると計算が不安定になりやすく、データの補正を行う等の注意が必要である。

以上、主要な項目について設定における留意事項を示したが、計算の着手時には、安定して計算を実行するための条件をある程度試行錯誤して設定する必要がある。検討対象期間内で、計算が不安定になりやすい流量変化が大きい期間や水位変動が大きい期間を抜き出して、テスト計算を行い、条件を検討しておけば、全期間で安定して計算できる条件が設定できよう。ただし、その際に、計算条件と検討の目的との整合がとれていることが必要不可欠である。

5. 計算事例

実際の貯水池の堆砂現象についての1次元河床変動モデルによる計算事例として、新潟県の鯖石川ダムの堆砂計算結果²⁾を示す。鯖石川ダム貯水池の平面形状を図-4に示す。鯖石川ダムの事例では、2.2節で記述した堆砂データを用いた流入土砂量の推定を行っており、推定結果を表-1に示す。また、堆砂中に占める粘土・シルトの割合が高いため、侵食速度式を用いており、式中のパラメータ

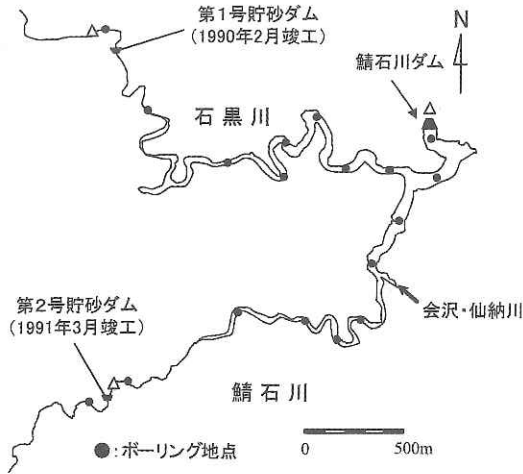


図-4 鯖石川貯水池平面形状

は、現地底泥を用いた侵食実験結果を参考に、 $\alpha_E = 0.5s^2/m^2$ 、 $\beta_E = 3$ 、 $u_{*c} = 0.05m/s$ を採用している。その他の計算条件を表-2に示す。

微細土砂の侵食速度式を導入した場合としない場合について、堆砂縦断形状の計算結果を観測結果と比較して図-5に示す。観測値と侵食速度式ありの計算結果を比較すると、堆砂の進行していく過程がよく再現されている。観測値において、1982年～1983年の間に低下量の大きい水位低下が実施され、堆砂形状の変化がもっとも大きかったが、この期間後の1987年の堆砂形状も計算値と観測値はよく似ている。一方、侵食速度式を考慮しない場合は、考慮した場合と比較して、初期には堆砂の全域で、それ以降では貯水池下流部での堆砂面の上昇が小さく、全体的に堆砂量が少なくなっており、再現性が良くない。鯖石川ダムのように微細土砂を多く含む貯水池を対象とした堆砂計算においては、微細土砂の侵食特性を考慮することが重要であるといえる。

図-6に2002年の計算結果（侵食速度式使用）の堆砂の鉛直方向の平均粒径を、ボーリングによる観測値と比較して示す。全体的に下流へ行くほど平均粒径は小さくなり、計算結果は、観測値の傾向を比較的よく再現している。計算値では、堆砂の上流部で粗い土砂と細かい土砂が交互に堆積しており、水位の上下動と流入土砂量の多少により、細粒成分が堆積する期間と洗い流されて粗粒化する期間が繰り返される現象が、再現されていると考えられる。

表-1 代表粒径と流入土砂パラメータの推定結果

粒径区分 No.	代表粒径 (mm)	鯖石川		石黒川		限界流量 Qc (m³/s)
		α	β	α	β	
細粒分	1	0.0035	6.1×10^{-6}	3.3	5.6×10^{-6}	3.0
	2	0.0059	2.0×10^{-6}	3.2	2.5×10^{-6}	2.9
	3	0.015	3.4×10^{-6}	2.6	4.3×10^{-6}	2.4
	4	0.032	3.1×10^{-6}	2.4	6.1×10^{-6}	2.1
	5	0.069	1.4×10^{-6}	2.4	3.6×10^{-6}	2.2
	6	0.16	2.1×10^{-6}	1.9	3.7×10^{-6}	2.1
粗粒分	7	0.46	4.9×10^{-4}	1.0	3.1×10^{-6}	2.0
	8	2.0	1.1×10^{-4}	1.0	8.5×10^{-7}	2.2
	9	9.5	3.1×10^{-6}	1.6	1.7×10^{-8}	3.0
	10	27	9.0×10^{-12}	5.0	2.8×10^{-12}	5.0

表-2 計算条件

説明	単位	値
計算時間刻み	sec	2
流下方向の空間刻み幅	m	60
流下方向の空間メッシュ数	個	129
横断面の鉛直方向分割厚さ	m	0.2
横断面の鉛直方向分割数	個	196
交換層厚	m	0.027
マンニングの粗度係数	$m^{-1/3} \cdot sec$	0.03
水の動粘性係数	m^2/s	0.000001
水の密度	kg/m^3	1,000
土粒子密度	kg/m^3	2,650
重力加速度	m/s^2	9.80665
カルマン定数	—	0.4
空隙率（間隙率）	—	0.6

6. まとめと今後の課題

堆砂予測の精度良い再現結果を得るために、堆砂データを用いて粒径別の流入土砂量を推定することが重要であり、細粒成分の占める割合が多い場合には、その侵食特性を考慮することが重要である。今回紹介したモデルは、流れの非定常性・浮遊砂の非平衡性を考慮しており、合流も扱えることから多くの貯水池に適用できるものと考えられる。特に既設ダムの堆砂対策では、堆砂実績という検証データがあり、モデルの信頼性を確保できるので精度の良い将来予測が可能になると考えられる。

現状のモデルの問題としては、以下のような点が挙げられ、今後の課題としたい。

一点目は、水面形計算を非定常で行っているため、安定して計算を行うためには、計算時間間隔を比較的短く設定する必要がある、計算時間が長

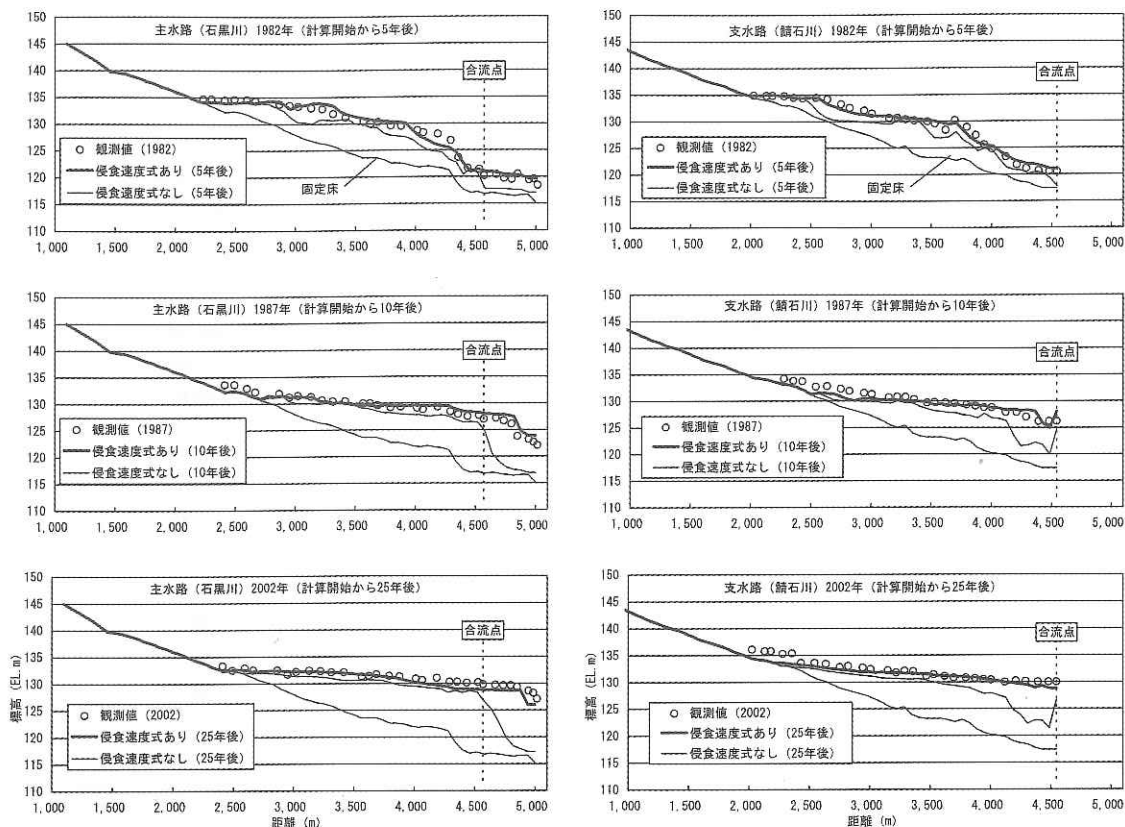


図-5 堆砂縦断形状の計算結果と観測結果の比較

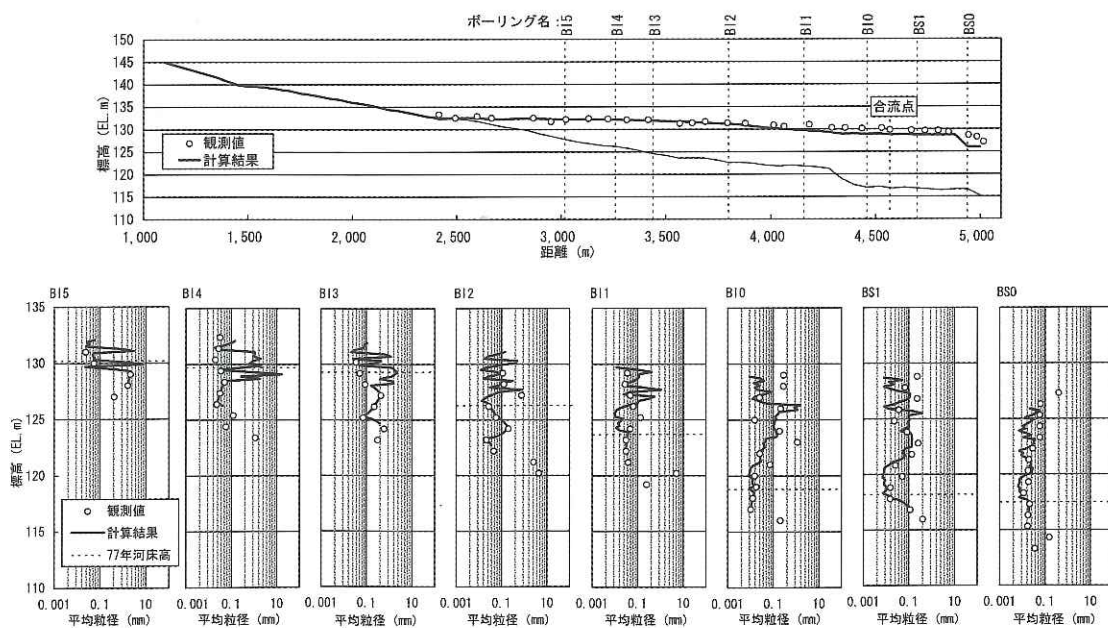


図-6 鉛直方向平均粒径の計算結果と観測値の比較 (2002年、石黒川)

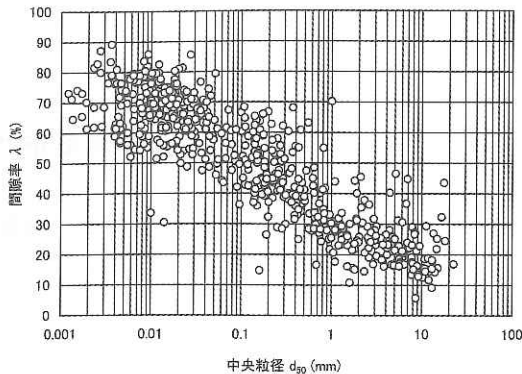


図-7 貯水池堆砂の中央粒径と空隙率の関係

くかかることである。例えば、計算格子間隔60m、計算格子数129個、土砂の代表粒径数10、計算対象期間1年、計算時間間隔2秒とした場合に、2003年時の上位機種デスクトップパソコンを用いて数日を要している。土砂移動に影響の少ない期間を短縮したり、検討する条件を絞り込んだりして計算する等の対応が考えられる。

二点目は、堆砂中の空隙率についてであり、堆砂のデータを分析した結果、図-7に示すように、50%粒径によって、かなり空隙率が異なることが確認されているが、各計算領域（流下方向及び鉛直方向）で空隙率を変化させることは、かなり複雑な処理をすることが必要になり、現状では、一定値の空隙率を用いて計算している。実際の計算では、全堆砂の平均的な空隙率を用いることとなるが、計算結果の解釈ではこの点を考慮しておく必要がある。

最後の三点目は、合流の計算方法において、合流の状況によるエネルギー損失等を考慮していない点である。実験結果の計算では、常流の合流では、精度の良い水面形の再現結果が得られているが、射流の合流では誤差が大きくなる傾向が認め

られている²⁾。

なお、本稿で示した堆砂予測モデルのプログラムについては土木研究所の著作物として登録され、目的に応じて有償または無償（研究目的の場合）での貸出を実施しており、関心のある方は著者までご連絡いただきたい。

参考文献

- 1) 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, 14 (4), pp.257-259, 2004
- 2) 櫻井寿之・鎌田昌行・柏井条介・鈴木伴征：混合粒径河床変動モデルによる貯水池堆砂・排砂現象の再現、ダム工学, 16 (1), pp.30-40, 2006.
- 3) (社)土木学会：常流・射流混在流れ、水理公式集例題プログラム集平成13年版、第2編河川編、例題2-9, 2001
- 4) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号, pp.56-69, 1972
- 5) 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
- 6) 井上卓也・清水康行：貯水池の水位変化を伴う貯水池の排砂に関する研究、水工学論文集、第46巻, pp.791-795, 2002
- 7) 芦田和男・道上正規：浮遊砂に関する研究 (1) —河床付近の濃度—、京都大学防災研究所年報、13号B, pp.233-242, 1970
- 8) 関根正人：実河川に自然堆積した粘性土の侵食機構の解明と現地侵食試験に関する研究、科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））研究成果報告書, p.7, 2004.

櫻井寿之*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム主任研究員
Toshiyuki SAKURAI

箱石憲昭**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム上席研究員
Noriaki HAKOISHI

柏井条介***



独立行政法人土木研究所企画部
研究企画監（前 つくば中央研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム上席研究員）
Josuke KASHIWAI