

ダムを含む沖積河川の土砂輸送について

SEDIMENT TRANSPORT OF ALLUVIAL RIVER AND RESERVOIR

坊野聡子¹・清水康行²・斎藤大作³・吉田義一⁴

by Satoko BOUNO, Yasuyuki SHIMIZU, Daisaku SAITOU, Yoshikazu YOSHIDA

¹ 学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

² 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³ 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所 (〒062-0931 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴ 正会員 工修 北海道開発局河川計画課長 (〒060-0808 札幌市北区北8条西2丁目)

In this study, sediment transport along the Saru River after construction of Nibutani dam is studied. The Saru River is known for transporting large quantities of sediment during flood. Sediment transport observation was conducted during the flood in 1997 at several stations, from the river mouth to upstream of the reservoir. A numerical model to calculate sediment transport rate, grain size of bed material, and bed elevation is developed. The calculated sediment transport rate is compared with the observed results and the validity of the model is confirmed. It is suggested that the model can be a powerful tool for the long-term prediction of the river bed environment changes including the effect of the dam construction.

Key Words: dam, reservoir, sediment transport

1. はじめに

本論文は、沖積河川の中流部にダムを建設した場合に、ダム上・下流に生じる；流砂の量および質；平均河床高；河床材料などの変化を予測するものである。

ダムなどの河川横断工作物が、河川の土砂環境に及ぼす影響については、従来から様々な調査・研究がおこなわれている。特に、貯水池への流入流砂量の算定については、古くから数多くの手法^{1),2)}が提案されている。また、河川横断工作物がない河川の、土砂輸送と河道形成のメカニズムについても、研究^{3),4)}されている。しかし、ダムなどを含む河川全体の土砂輸送を研究対象としたものは、ほとんどみられない。

そこで、本研究では、北海道の日高地方に位置する一級河川沙流川を例に——河口から二風谷ダム(1996年4月完成)を含む上流約30km区間まで——、土砂輸送の実態と河床の変化を明らかにする。

研究は次の手順ですすめる。

1. 過去の現地の河道データの整理
2. 出水時における河川および貯水池内での多地点連続土砂観測
3. 出水時の流れと流砂の数値計算モデルによる再現
4. 数値計算モデルによる長期的な河床変化の再現

はじめに、ダム完成前後の測量データを検討することに

より、ダム建設の変化の傾向を調べる。次に、1997年8月の出水時の観測結果を示し、この出水期間中の土砂の挙動を数値計算モデルを用いて再現する。

ダム建設の影響として、河床材料や河床形状の変化などの直接的なものと、これに伴う生態系や河川環境に与える波及的なものとが考えられる。これらの影響は、決して短期的なものではない。このことから、数年、あるいは数十年単位の間の変化を正確に予測する手段の確立が求められていることが分かる。この手段のひとつとして、混合粒径の河床変動計算モデルを選び、1996年4月(ダム完成時)から1997年12月までの約1年9ヶ月間の数値計算をおこない、計算結果と実測データの比較および検討をする。

なお、計算モデルには、出水時の観測結果——河川の流送土砂量の大部分が河床材料中に存在しないような微細成分である——を考慮し、従来の河川の縦断形状の計算に用いられる、河床材料から掃流砂・浮遊砂を計算するモデルに、新たに Wash Load の輸送を組みこむものとする。さらに、ダム・貯砂ダム地点における流れ・流砂の境界条件、浮遊砂の非定常性などの点で、新しい工夫を加えた。

本研究は、ある特定の河川およびダムを対象としておこなわれるが、ダムを含む河川の土砂輸送の特性やその影響などに関して、河川工学上有益な多くの情報を提供するものである。

2. 沙流川の河道特性量の変化

沙流川は、北海道の日高山系から太平洋へと流れる一級河川であり、流砂が多いことでも知られている。この川の河口から約 21.4km 地点に位置する二風谷ダム (1996 年 4 月完成) の放流ゲートは、河床付近に設置されているため、水と共に土砂を排出することができる。ダムからさらに約 5.6km 上流には、堆砂防止のために貯砂ダムが建設されている。

図-1 は沙流川および二風谷ダムの模式図であり、図中で●で示される地点には自動観測装置が設置され、常時濁度が観測されている。ここで、河口から貯砂ダム上流までを、次に示す 5 つの区間——区間 1: KP 0.0-3.0；区間 2: KP 3.0-17.0；区間 3: KP 17.0-21.4；区間 4: KP 21.4-27.2；区間 5: KP 27.2-30.6——に分ける。なお、KP 0.0 は河口地点、KP 3.0 は富川地点、KP 17.0 は平取地点、KP 21.4 は二風谷ダム地点、KP 27.2 は貯砂ダム地点である。

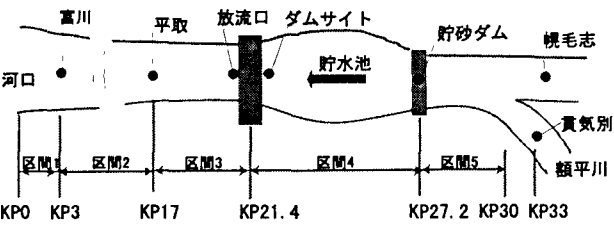


図-1 沙流川および二風谷ダムの模式図 (●は定点)

表-1 沙流川の堆積および洗掘量 :単位 (1,000 m³)

年 \ 区間	区間 1	区間 2	区間 3	区間 4	区間 5
1978 ~ 82	-72	-704	-140	---	---
1982 ~ 87	-22	-50	51	---	---
1987 ~ 92	-88	-44	39	---	---
1992 ~ 97	-175	171	-274	---	---
1996 ~ 97	---	---	---	282	379

1978 年から現在までの、横断測量データにもとづく平均河床高の変化から、期間別・区間毎の堆砂量および洗掘量を示したのが表-1 である。表のうち、1992 年から 1997 年の値をみると、ダム下流で河床の低下、ダム上流では堆砂が起きていることがわかる。図-2 は、沙流川において調査された河床材料データのうち、50 % 粒径の縦断分布を観測年別に示す。ダム下流では、河口から上流に向かって粒径は少しずつ粗くなっていく傾向が見られる。一方、ダム上流区間、特にダム貯水池内で、粒径が極端に細くなっていることがわかる。

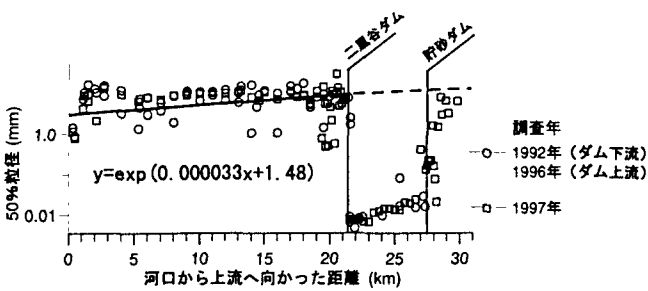


図-2 河床材料 (50% 粒径) の縦断方向分布の経年変化

3. 出水時の観測結果

ダム建設が河床に与える影響を把握するためには、ダム建設後の貯水池およびその上下流の土砂輸送を、継続的に調査する必要がある。特に、土砂輸送の大部分は出水時に発生するため出水時の観測は極めて重要である。1997 年 8 月 10 日から 13 日にわたり台風 11 号くずれの熱帯低気圧とこれに刺激された北海道南部の停滞前線によって、沙流川流域に集中的な豪雨がもたらされた。この出水時のダム流域平均時間降雨、流量およびダム貯水位を図-3 に示す。二風谷ダム地点でピーク流入量は約 1,800m³/s にも達し、これは観測史上第 3 番目の大規模な出水である——ダム完成時から最大——。出水期間中には放流ゲート 7 門すべてが開けられ、流入量に等しい放流量を保つ操作がおこなわれた。

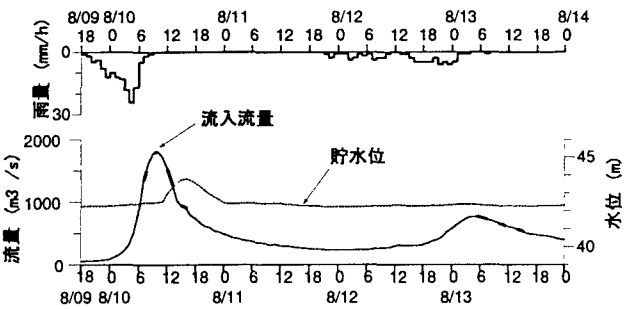


図-3 出水期間中 (1997 年 8 月 9 日～13 日) のダム流域平均時間雨量、ダム流入流量及びダム貯水位

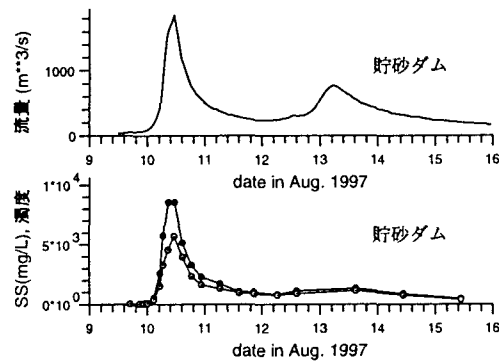


図-4 出水期間中の流量、SS 及び濁度の時間的变化

出水期間中には図-1 に丸で示される 7 地点——幌毛志、貫気別、貯砂ダム、ダムサイト、放流口、平取、富川——において継続的な流量観測と採水をおこない、濁度・Suspended Solids (SS) を調査した⁵⁾。ここで、濁度とは光の透過度から求められる濁りの度合いであり、SS はろ過した残留物を (mg/l) で表示したものである。図-4 に代表として貯砂ダム地点の観測結果をダム流入流量と共に示す。ここで、白丸 (○) は濁度、黒丸 (●) は SS (mg/l) を表している。SS と濁度はほぼ一致しているが、SS が 5000mg/l を超えるような高濃度時には、濁度の値が SS の値をやや下回る傾向がみられる。

4. 数値計算

4.1 数値計算モデルの特徴

表-2 数値計算に用いる河床材料の粒径区分

d _i	粒径の範囲	代表粒径 (mm)
1	河床に存在しない微細成分	0.010
2	河床に存在する 0.074mm 以下の成分	0.074
3	0.074~0.2mm	0.137
4	0.2~0.4mm	0.3
5	0.4~1mm	0.7
6	1~2mm	1.5
7	2~4mm	3.0
8	4~10mm	7.0
9	10~20mm	15.0
10	20~40mm	30.0
11	40mm 以上	70.0

出水期間中の通過流砂量、およびダム完成後の河床の変化を数値計算で再現する。従来の計算モデルは河床に存在する流砂のみを計算に用いていたのに対して、今回作成したモデルは河床に存在しないような細かい粒径の流砂——Wash Load——を組み入れている。一般に、河川では Wash Load は河床とは交換されることなく通過すると考えられているが、ダムなどによって水や流砂の流れを遮られる場合に同様に考えるのは無理がある。本論文では、流砂を表-2 に示すような 11 のクラスの粒径に分割し、Wash Load 成分を初期の河床材料中には存在しない最小粒径 0.01mm の流砂と仮定して上流端から与える。上流端から与える WashLoad の量は、出水期間中の SS の観測結果にもとづいて次式により与える⁵⁾。なお、粒径 0.01mm は観測された SS データの代表的な粒径である。

$$Q_s = 1.39 \times 10^{-6} Q^{2.0178} \quad (1)$$

上式によって上流端から与えられた WashLoad は、計算区間内において浮遊砂と同じ扱いが可能であるものと仮定する。

4.2 基礎式

計算モデルで用いる基礎式は、清水⁶⁾らによって提案された方法にもとづくものとする。流れの基本式は 1 次元定常流の運動方程式、掃流砂量式は芦田・道上の式、浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式を用いる。本論文では、ダム貯水池内の流砂を扱うために、左辺第 1 項の濃度の時間変化の項や右辺第 4 項の拡散項を考慮する粒径別浮遊砂濃度の連続式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(< c_i > h) + \frac{1}{B} \frac{\partial(Q < c_i >)}{\partial x} = q_{sui} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_x < c_{xi} >}{B} + D_s \frac{\partial^2(< c_i > h)}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここで、 x は流下方向距離、 t は時間、 h は水深、 B は低水路幅、 Q は流量、 q_{sui} は粒径別浮遊砂の単位面積当たりの浮上量、 w_{fi} は粒径別浮遊砂の沈降速度であり、Rubey の式から求める。 q_x は横流入流量であり、 D_s は浮遊砂の流下方向の拡散係数、 c_{bi} は河床付近の粒径別浮遊砂濃度、 $< c_i >$ は水深平均の粒径別浮遊砂濃度、 $< c_{xi} >$ は水深平均の粒径別横流入浮遊砂濃度であり $< c_i >$ と等しいと仮定する。

4.3 初期条件および境界条件

計算区間は水位データの得られる最下流端地点の富川地点から貯砂ダム上流地点までの約 30km 区間とする。沙流川は貯砂ダム上流において主要支川の額平川と合流しているが、計算の便宜上、2 つの川をあわせて 1 つの河川として扱う。計算流量としてダム流入時間流量を用い、水位の境界条件は富川、平取、二風谷ダム地点で実測データを与え、それぞれの区間では、次式で表わされる横流入流量を考慮する。

$$q_x = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3)$$

また、貯砂ダム地点では流量から限界水深を求める。

$$h_c = (Q^2 / g B^2)^{1/3} \quad (4)$$

ここで、 h_c は限界水深、 g は重力加速度である。これは、貯砂ダム地点では堤体全面にわたって越流しており、越流水深が限界水深となっていることによる。

また、掃流砂・浮遊砂は上流端で動的平衡状態を仮定する。初期河床材料は、過去のデータをもとにした近似式 (5)~(7) を用い、各地点で対数正規分布を仮定することにより与える。

$$d_{10} = \exp(0.00553KP - 0.96231) \quad (5)$$

$$d_{50} = \exp(0.03250KP + 1.48351) \quad (6)$$

$$d_{90} = \exp(0.02116KP + 3.44998) \quad (7)$$

ここで d_{10} , d_{50} , d_{90} はそれぞれ 10%粒径, 50%粒径, 90%粒径の粒径 (mm) である. なお初期河床高および低水路幅の初期条件は, 河口からダム地点までは 1992 年の実測データを, ダム地点から上流までは 1996 年の実測データを与える.

4.4 数値計算結果

(1997 年 8 月 9 日 12 時 ~ 15 日 12 時)

上記のモデルを用いて図-1 に示した区間で 1997 年 8 月 9 日 12 時から 15 日 12 時までの 6 日間の出水期間中の通過流砂量の計算をする. 各地点の流量および SS の値から, 次式を用いて流砂量の推定をおこなう.

$$Q_s = \frac{QS}{w_s 10^6} \quad (8)$$

ただし, Q_s は流砂量 (m^3/s), S は SS (mg/ℓ), w_s は浮遊粒子の単位体積重量 (g/cm^3) である. 浮遊粒子の単位体積重量 w_s を $2.65(g/cm^3)$ と仮定し, 各地点の流砂量を推定する.

図-5 に出水期間中の WashLoad — 0.01mm — の各地点の通過量を示す. 点線は WashLoad の通過量, 黒丸は観測による SS データを流砂量に換算した値を示す. 図より, 計算から得られる WashLoad の通過量が SS 観測から得られる通過流砂量とほぼ対応していることが分かる.

4.5 数値計算結果

(1996 年 4 月 ~ 1997 年 12 月)

次に, ダムが完成した 1996 年 4 月から 1997 年 12 月までの約 1 年 9 ヶ月間の, 平均河床高の変化および河床材料の変化の計算結果を, 実測値と比較検討する.

図-6 は初期河床高を基準として変化量を表したものである. 図中の実線は基準値, 点線は計算値, 黒丸は実測値をそれぞれ表している. この実測値はダム下流では 1992 年と 1997 年, ダム上流では 1996 年と 1997 年の測量による平均河床高データの差から算出されている. ここで, ダム上流, 特に貯砂ダム上流区間では堆積が, ダム直下においては河床低下が計算されている. 計算値は実測値の傾向とほぼ一致し, 堆積量も同じ程度である.

図-7 は河床材料の粒径変化の計算結果である. 上から順に, 90%粒径, 50%粒径, 10%粒径の変化を示してい

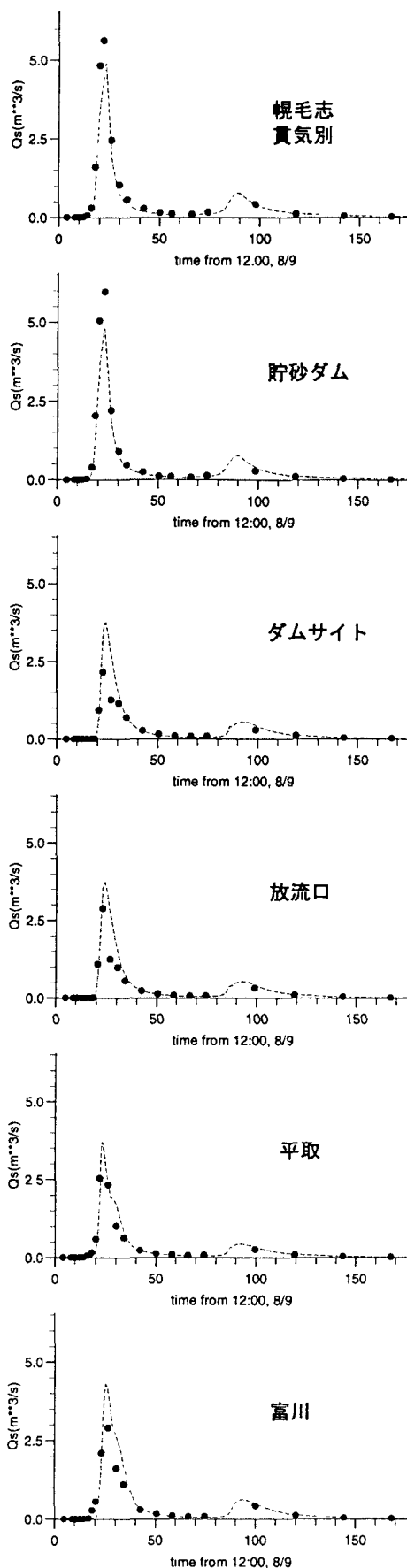


図-5 通過流砂量の時間的变化

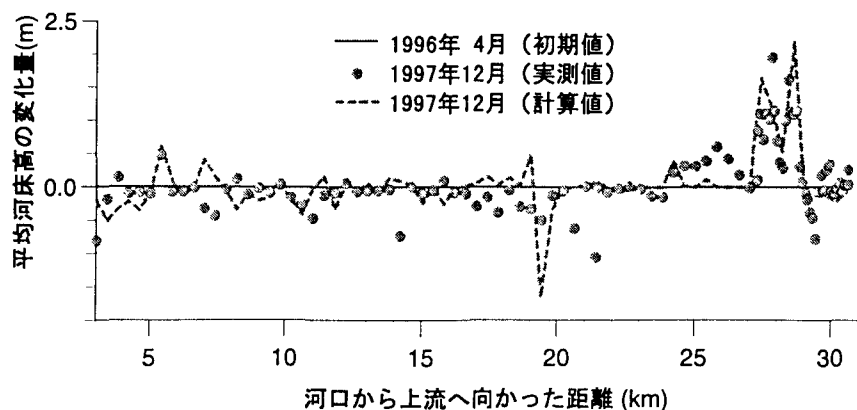


図-6 平均河床高の変化 (1996 年 4 月～1997 年 12 月)

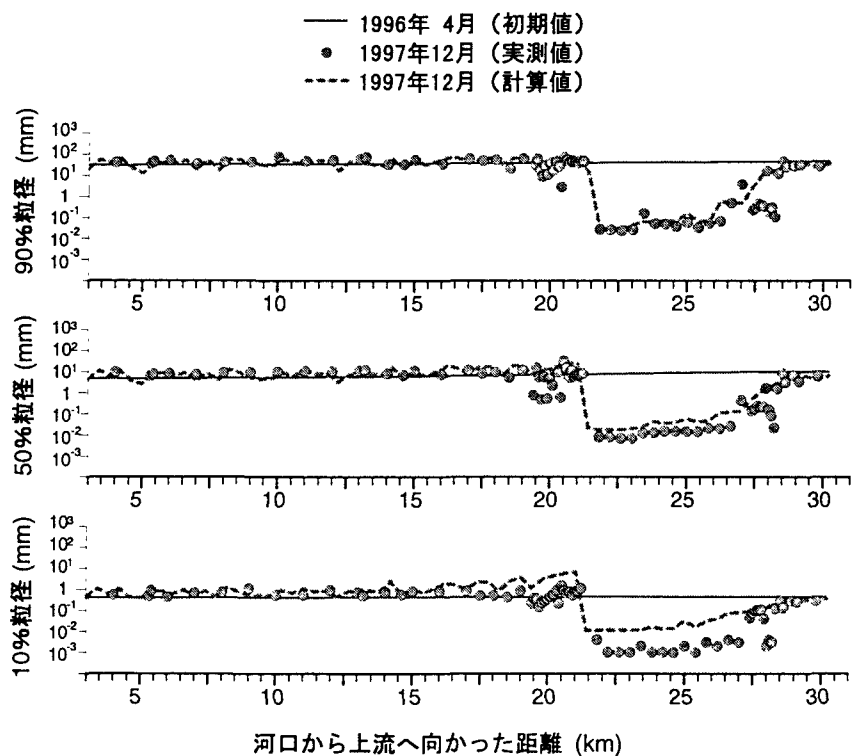


図-7 河床材料の変化 (1996 年 4 月～1997 年 12 月)

表-3 沙流川の土砂通過量の累計および堆積量 (1996 年 4 月～1997 年 12 月) :単位 (1,000 m³)

地点	区間 1	富川	区間 2	平取	区間 3	ダム	区間 4	貯砂ダム	区間 5	上流端
WashLoad 通過量		467		417		444		508		513
浮遊砂通過量		202		157		155		673		839
掃流砂通過量		241		94		2		29		585
全流砂通過量		899		665		601		1157		1882
平均河床高の差 (計算値)	—		-126		-114		263		329	
平均河床高の差 (実測値)	-174		-171		-274		282		379	

る。初期値は実線で、計算結果は破線、黒丸（●）は実測値を表している。90%粒径、50%粒径、10%粒径は、ダム貯水池内では細かく、ダム下流では粗くなっており⁷⁾、この傾向は計算値によっても表されている。ダム貯水池内の10%粒径の計算値は実測値と比較して粗くなっているが、これは計算で用いる流砂の最小粒径を0.01mmとしたために、0.01mm以下の粒径は表現不可能であるためである。

1996年4月から1997年12月までの土砂通過量の累計および堆積量の計算結果をそれぞれの区間毎成分別に表-3に示す。上からWash Load、浮遊砂、掃流砂、全流砂の通過量を示す。なお下段には、平均河床高の差から算出した堆積量の計算値と実測値を示す。貯砂ダム上流の区間で掃流砂の大部分が堆積するが、通過した掃流砂のほとんどは貯水池内に堆積している。また、浮遊砂の多くは貯砂ダム地点を通過したあと、貯水池内で堆積しているのに対し、WashLoadは貯砂ダムを通過した後、その一部は貯水池内に堆積するものの、残りはダム地点を通過することがわかる。計算による平均河床高の変化量を見るとダム上流で堆積、ダム下流では洗掘が起こっている。この計算による堆積量を測量による平均河床高データの差から算出した実測堆積量と比較すると、河床変化の傾向およびその量をほぼ表せていることがわかる。

5. おわりに

沖積河川の中流部にダムが建設された場合の、ダム上・下流を通過する流砂量、および河床変動・河床材料の変化について検討をおこなった。ダムを含む広範囲にわたる区間の測量データ、観測史上第3番目という極めて規模の大きな出水期間中の連続採水データおよび数値計算をとおして得られた知見を以下に列挙する。

1) ダム上流での流砂の堆積および河床材料の細粒化、ダム下流での洗掘による平均河床高の低下および河床材料の粗粒化の現象が確認された。

2) WashLoadを組みこんだ数値計算モデルを用いて出水期間中計算をおこなった結果、WashLoad——0.01mm——の通過量でSSデータによる通過流砂量を再現できることがわかった。

3) ダム完成から約1年9ヶ月間の平均河床高の変化および河床材料の変化を再現することにより、各区間で堆積・洗掘する土砂の質と量が明らかにした。貯砂ダム上流では約350,000m³程度の堆砂があり、そのほとんどが掃流砂であること、ダム貯水池内では約270,000m³程度の堆砂がありその多くは浮遊砂およびWashLoadに起因していることがわかった。

謝辞: 本研究のデータは、北海道開発局室蘭開発建設部沙流川ダム建設事務所および二風谷ダム管理所から提供を受けた。またその他、開発土木研究所河川研究室、(株)北海水工コンサルタント、(株)福田水文センター、(株)松木設計、(株)パブリックコンサルタントなどから多大な協力を得たことをここに付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 河田恵昭, 植本実: “ダム堆砂の支配要因について”, 水工学論文集, 第42巻, pp1027-1032, 1998.
- 2) 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴: “セキ宿貯水池におけるウォッシュロードの流入・流動・堆積過程に関する観測と考察”, 水工学論文集, 第41巻, pp777-782, 1997.
- 3) 黒木幹男, 板倉忠興: “安定河道縦断形状に関する研究”, 水工学論文集, 第39巻, pp641-646, 1996.
- 4) 清水康行, 嵯峨浩, 早川博, 品川守: “石狩川の土砂流出に関する研究”, 水工学論文集, 第42巻, pp1039-1044, 1998.
- 5) 坊野聡子, 清水康行, 齋藤大作, 吉田義一, 黒木幹男: “出水のダム貯水池における濁質観測”, 水工学論文集, 第42巻, pp715-720, 1998.
- 6) 清水康行: “沖積河川の縦断形と河床材料分布形の形成について”, 土木学会論文報告集, 第521号, pp.69-78, 1995.
- 7) 平野宗夫: “Armoringをともしう河床低下について”, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.

(1998. 9.30受付)