

# ダムを含む河川の流砂と河床変動に関する研究

坊野聰子<sup>1</sup>・清水康行<sup>2</sup>・黒木幹男<sup>2</sup>・藤田睦博<sup>3</sup>・吉田義一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本建設コンサルタント(〒0141-0022 東京都品川区東五反田5-2-4)

<sup>2</sup>正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授(同上)

<sup>3</sup>正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科教授(同上)

<sup>4</sup>正会員 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)

本研究は土砂輸送を伴う冲積地河川の中流部にダムが建設された場合の土砂輸送環境の変化を検討したものである。北海道の沙流川河口部から約20km地点に建設された二風谷ダムを例として、その貯水池を含む上下流約30km区間の出水時の連続土砂観測、河床形状および河床材料の調査、および流れと流砂・河床変動の数値計算モデルなどを用いてダムを含む河川の土砂輸送環境の実態を定量的に明らかにした。この結果、ダム上流、貯水池、ダム下流の河川における土砂の収支が質的・量的に明らかにされ、ダムおよび河川の長期的な維持管理に対して極めて有効な知見を得ることが出来た。

**Key Words :** dam, reservoir, sediment transport, wash load

## 1. はじめに

一般に土砂輸送を伴う河川にダムや堰堤などの河川横断工作物が建設された場合、水理条件の変化によりダム上下流の河道環境が変化する。貯水池への土砂堆積やダム下流河川の河床低下、河床材料や河床形態の変化などの直接的な影響はもとより、これに伴う生態系や河川環境に与える波及的な影響は少なくない。

ダムや堰堤などの河川横断工作物の土砂環境に対する影響は從来から様々な観点から調査・研究が行われている。特に貯水池への流入流砂量の算定や堆砂量の算定法は貯水池の管理上重要な課題であり、古くから数多くの手法が提案されており<sup>1),2)</sup>、近年では堆砂の量のみならず質について扱ったもの<sup>3)</sup>も見られる。また、ダム下流の河床変動や河床材料の変化を扱った研究<sup>4)</sup>も進められている。一方、沖積河川の平衡縦断形状や横断形状などを扱った研究<sup>5),6),7)</sup>も行われており、ダムなどの人工的な影響が無い場合の土砂輸送と河道形成のメカニズムはある程度明らかになりつつある。これに対して、ダムなどの影響を含む河川の土砂輸送を扱った研究は海外においては行われているが<sup>8)</sup>、国内においてはほとんど見られない。しかし近年日本においてもダム建設が河口から海域への流出土砂量やその質に与える影響の定量的な算定法の確立など求められている。

そこで本研究は北海道の日高地方に位置する一級河川沙流川およびこの河口から約21.4km上流地点に建設された二風谷ダム(1996年4月完成)を例に、その土砂

輸送の実態を明らかにしようとするものである。本研究ではまず、沙流川の河口から貯水池を含む約30km区間の河道横断測量・河床材料などの調査結果から近年の河道の変動傾向を把握するとともに出水時に連続的に流量・流砂量観測を実施し、ダムを含む河川の流砂の実態を明らかにする。ここで観測対象とした出水は既往第3位(ダム流入流量のピークが約1,900m<sup>3</sup>/s)という大規模なものである上、流入流量のピーク2山を含む約4日間に亘る連続的な観測データは極めて貴重なものである。現地観測および調査によりダムを含む土砂輸送の実態は量的に明らかにされたが、さらに流砂の成分別の収支を明らかにするために河床変動計算モデルを用いた検討が行われた。ここでモデルは基本的には従来から河川の縦断形状の計算に使われる混合粒径、浮遊砂・掃流砂のモデルを用いたが、本論文においては特にWash Loadの輸送、ダムや貯砂ダム地点での境界条件および浮遊砂の非定常性などの点で新しい工夫が加えられている。これらの現地観測および数値計算の結果によりダムを含む河川の出水時の土砂動態が明らかにされるが、本研究では出水期間を含むより長期間のダムの影響についての検討も行われる。

本研究はある特定の河川およびダムを対象として行われたものであるが、近年わが国で問題となりつつあるダムを含む河川における流砂の量や質の変化、それに伴う河床高や河床材料の変化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。

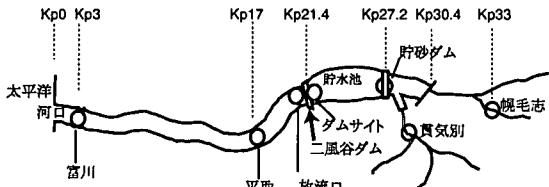


図-1 沙流川の模式図(○は観測地点)

## 2. 対象区間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、その名が示すように流砂が多いことで知られている。この沙流川の中流部、河口から 21.4km 上流地点に建設された二風谷ダム(1996年4月完成)は設計時から貯水池の堆砂問題が懸念されていたため、貯水池上流端には流入土砂の軽減対策としての貯砂ダムや、ダムの本体の河床付近への排砂機能を併せ持つ放流ゲートの設置などの対策が施されている。

沙流川および二風谷ダムの位置関係を模式的に図-1に示す。図中に白丸で示す7地点は次章で述べる出水時の観測地点である。本研究においては、便宜上河口から貯砂ダム上流までを次の5つの区間に分割して扱うこととする。

- 区間1 河口から富川地点( $K_p$  0.0~3.0)
- 区間2 富川地点から平取地点( $K_p$  3.0~17.0)
- 区間3 平取地点から二風谷ダム地点( $K_p$  17.0~21.4)
- 区間4 二風谷ダム地点から貯砂ダム地点( $K_p$  21.4~27.2)
- 区間5 貯砂ダム地点から上流( $K_p$  27.2~30.6)

ここで、 $K_p$  は河口からの距離(km)を表す。

表-1は検討対象区間の過去20年間の横断測量および河床材料調査状況である。これらのデータを用いて、対象区間の平均河床高、低水路幅および河床材料の近年の変化を示す。

### (1) 沙流川の堆積量と洗掘量

過去の横断測量結果から堆積量および洗掘量を算定するため、平均河床高及び低水路幅を決める。平均河床高及び低水路幅は横断図および平面図から目視により低水路幅を定め、この低水路幅内における河床高の平均を平均河床高とする。算出された低水路幅および平均河床高の変化量を用いて、上記の区間別に単位年当たりの河床変動量を体積で表示したのが表-2である。河口からダム地点までの区間は堆積・洗掘が混在した状態となっているが、全体的には河床が低下する傾向となっていることが分かる。この傾向がダムの完成の1996年以前から見られるが、これは1981年10月から3回に

表-1 沙流川における過去20年間の横断測量および河床材料調査状況

年・月	横断測量	河床材料調査	備考
1978	区間1-3	—	—
1979	—	区間1-3	—
1982	区間1-3	—	—
1987	区間1-3	—	—
1992	区間1-3	区間1-3	—
1996.4	区間4-5	区間1-3	ダム完成直前
1996.6	—	区間4	貯水池内観測
1997.12	区間1-5	区間1-5	出水後観測

表-2 検討対象区間の河道内堆積および洗掘量  
単位: (1,000 m<sup>3</sup>/年)

年\区間	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5
1978~82	-17.8	-17.3	-34.7	—	—
1982~87	-3.0	-11.6	-7.7	—	—
1987~92	-14.5	-12.1	-1.5	—	—
1992~97	-30.7	-36.9	-34.3	—	—
1996~97	—	—	—	379.9	245.1

分けて行われた川の仮締め切りによると推定される。1978年から1982年にかけて大きな変化が見られるが、これは1981年8月の大出水によるものである。ダム上流ではすべて堆積傾向となっており、貯水池内で約379,900(m<sup>3</sup>)、貯砂ダム上流では約245,100(m<sup>3</sup>)の堆砂が見られる。

### (2) 縦断方向河床形状と低水路幅の相関関係

ここでは河川の微視的な縦断河床勾配の変化に着目し、対象河道を分割してそれぞれの区間ににおける河床高の変化と低水路幅の関係を調べる。

図-2は低水路幅を調査年別に縦断的に示したものである。なお図中で河口からの距離が21.4kmより上流の値は貯水池の常時満水位時の水面幅である。低水路幅の経年的な変化はほとんど見られず、平面的な河道変化はほとんど無いようである。次に1996年の平均河床高の近似式を求め、この近似式から得られる値と実際の平均河床高の差を求める。

$$Z = 0.0107K_p^2 + 1.318K_p - 1.904 \quad (1)$$

$$dz = H - Z \quad (2)$$

ただし  $Z$  は平均河床高の包絡値(m),  $H$  は平均河床高(m),  $dz$  は平均河床高と近似式から得られる値との差(m)である。縦軸に  $dz$  を、横軸に河口からの距離  $K_p$  をとり、これらの関係を図-3に示す。図-2および図-3によれば低水路幅が広い地点では  $dz$  は大きくなり、低水路幅が狭い地点では  $dz$  が小さくなる傾向が見られる。

上記の  $dz$  と1996年の低水路幅の相関関係を図-4に示す。図によれば、両者には強い正の相関関係が見られ、河口からダム下流地点までの  $dz$  は低水路幅の大小に大きく依存していることが分かる。

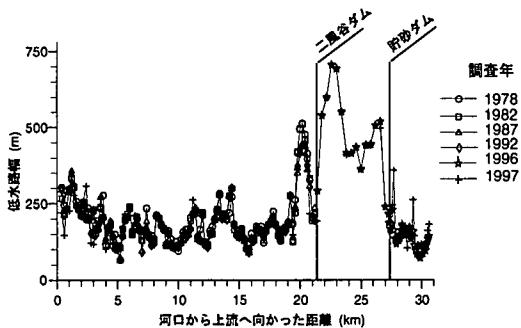


図-2 低水路幅の縦断分布

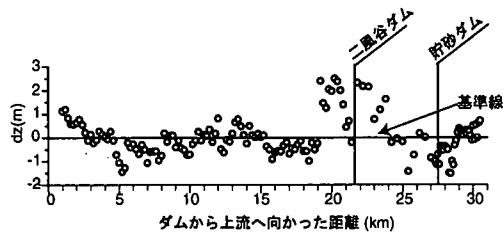


図-3  $dz$  の縦断分布（ダム下流区間；1992～1997年変化、ダム上流区間；1996～1997年変化）

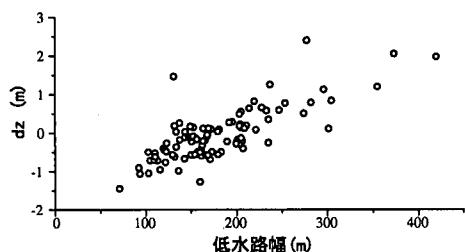


図-4 低水路幅と  $dz$  の関係

### (3) 河床材料

図-5 はダム完成後に調査された河床材料の粒度特性を縦断的に示したものである。上から順に 90% 粒径、50% 粒径、10% 粒径であり、次式は図中の 1996 年のデータの近似式である。

$$d_{10} = \exp(0.006K_p - 0.96) \quad (3)$$

$$d_{50} = \exp(0.033K_p + 1.48) \quad (4)$$

$$d_{90} = \exp(0.021K_p + 3.45) \quad (5)$$

ここで、 $d_{10}$  は 10% 粒径 (mm)、 $d_{50}$  は 50% 粒径 (mm)、 $d_{90}$  は 90% 粒径 (mm) である。

全体的に上流から下流方向へと粒径が細くなる傾向がみられる。ダム上流区間においても粒径分布が上流から下流へと急激に細粒化する傾向が見られるが、これは貯水池内で堆積する際に上流から順に粒径の大きなものから堆積していくためと考えられる。またダ

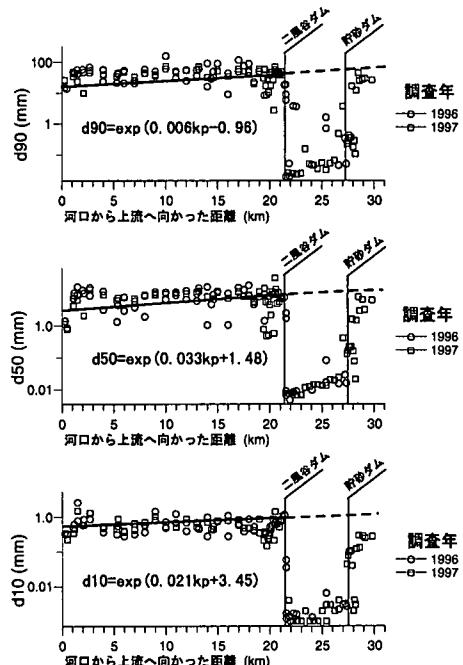


図-5 河床材料（10%, 50%, 90% 粒径）の縦断方向分布

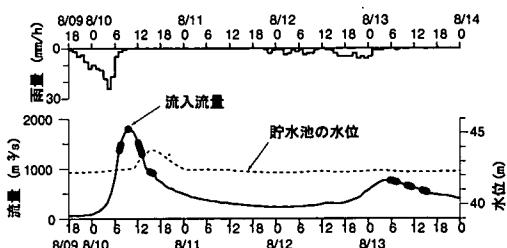


図-6 出水期間中（1997年8月9日～13日）の時間雨量、流量及びダム貯水位

ム貯水池区間では他の区間に比較して粒径が極端に細くなっている。

以上、過去の測量および調査結果からダム上流での堆砂および河床材料の細粒化、ダム下流での平均河床高の低下が確認された。また低水路幅と縦断方向河床高の変化との間に正の相関関係があることから、河床の変化が低水路幅によって決まる傾向があることが改めて確認される結果となった。

### 3. 1997年8月の出水時の観測結果<sup>9)</sup>

ダム建設による出水時の土砂輸送環境の変化を把握するためには、ダム建設が貯水池およびその上下流の土砂輸送に与える影響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

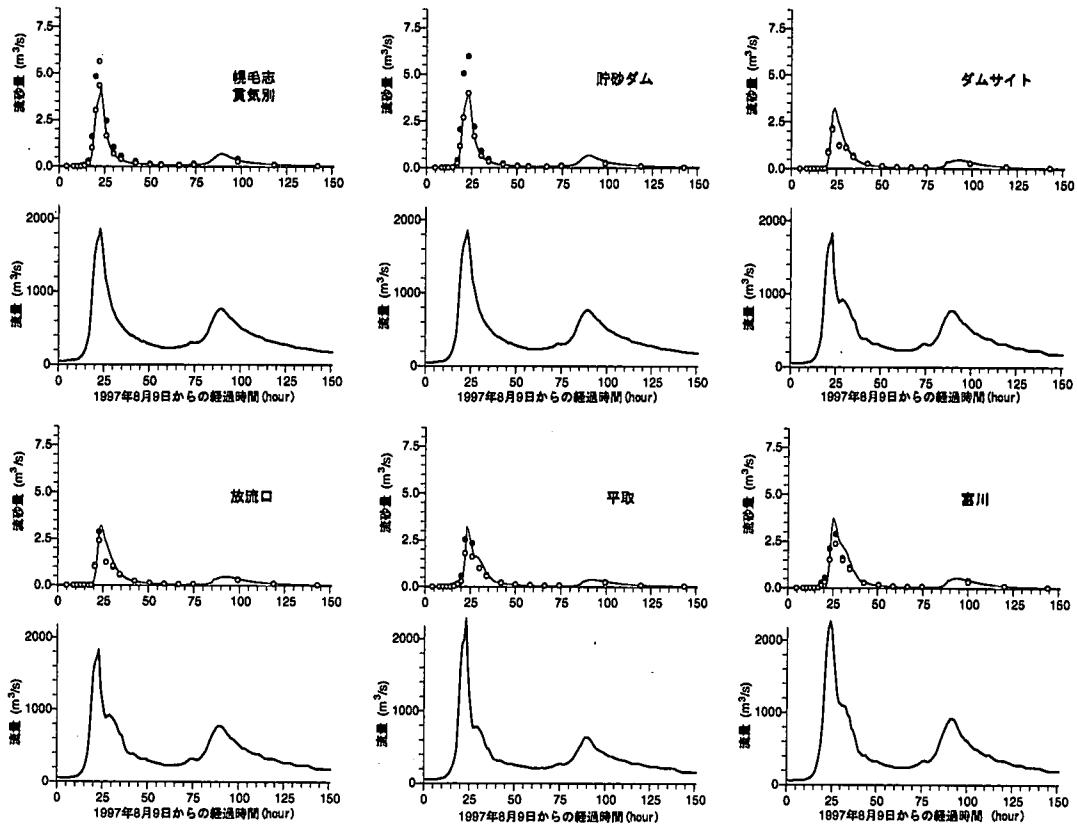


図-7 定点における濁度・SS から算出された流砂量と流量の時間的変化

観測は極めて重要である。

沙流川水系においてはダム完成後間もない 1997 年 8 月 10 日～13 日の間、台風 11 号の北海道接近とこれに刺激された北海道南部の停滞前線により集中豪雨が発生した。この集中豪雨により、二風谷ダム地点ではピーク流入流量が約 1,800m<sup>3</sup>/s にも達し、観測史上第 3 番目、ダム完成後では最大規模の出水となった。この出水期間におけるダム流域平均時間降雨、流量およびダム貯水位を図-6 に示す（図中の太線で示される期間は貯水池内観測が行われた時間帯である）。この出水期間中、ダムの放流ゲート 7 門すべてが開けられ、流入量にはほぼ等しい放流が行われた。

### (1) 定点観測

この出水期間中、図-1 に○で示された 7 地点（幌毛志、貫気別、貯砂ダム、ダムサイト（堤体直上流）、放流口（ダム直下）、平取、富川）において連続的な流量観測と採水が行われ、採水された資料をもとに濁度と SS (Suspended Solids) の分析が行われた。ここで濁度は濁度計によって計測されたものであり、SS は採水資料を濾過した残留物を [mg/l] 単位で表示したものである。各地点の流量および SS・濁度の値から次式を用いて浮

遊粒子流砂量の推定を行う。ここで第 4 章の計算モデルで用いる Bed Material Load (浮遊砂・掃流砂) との違いを明確にするため、本論文では SS・濁度を流砂量換算したものを実測の浮遊粒子流砂量とする。

$$Q_s = \frac{QS}{w_s 1000^2} \quad (6)$$

ただし、 $Q_s$  は浮遊粒子流砂量 (m<sup>3</sup>/s)、 $Q$  は流量 (m<sup>3</sup>/s)、 $S$  は SS(mg/l) および濁度、 $w_s$  は浮遊粒子の単位体積重量 (g/cm<sup>3</sup>)、浮遊粒子の単位体積重量を  $w_s = 2.65(\text{g}/\text{cm}^3)$  と仮定する。

7 地点の各観測時の SS・濁度および流量から式 (6) で浮遊粒子流砂量を推定して流量との関係を示したのが図-7 である。上図の白丸 (○) は濁度から算出した浮遊粒子流砂量、黒丸 (●) は SS(mg/l) から算出した浮遊粒子流砂量、実線は後に述べる数値計算によって求めた浮遊粒子流砂量である。下図の実線はそれぞれの地点の時間流量を示しており、貯砂ダム地点の流量はダム流入流量、ダムサイト及び放流口の流量は全放流量である。ダムサイト地点以外の SS・濁度データは表面付近の採水によって得られたものであり、ダムサイトのデータは上層・中層・下層の 3 点を採水し、これを平均したものである。いずれの地点においても SS から算出された浮遊粒子流砂量と濁度から算出された浮遊粒子流砂

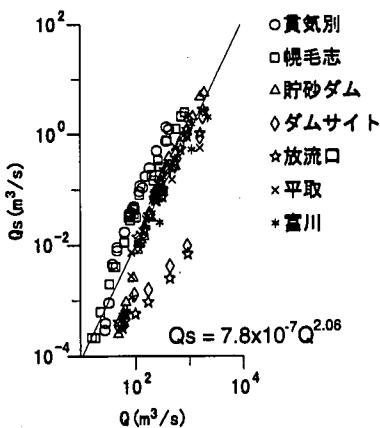


図-8 流量とSSによる流砂量の関係(全観測地点)

量はほぼ一致しているが、浮遊粒子流砂量の多い時には濁度から算出された浮遊粒子流砂量がSSから算出された浮遊粒子流砂量を若干下回る傾向が見られる。これは、浮遊粒子流砂量の多い時には採水資料中に比較的粒径の大きな成分が含まれるために、濁度を計測する際に沈降してしまうため濁度が過小評価されるためである。流量ピークを見ると貯水池上流の島毛志および支川の貢気別の合計流量が河口に近い富川地点まで、量的にも時間的にも大きな変化なく記録されている。それに対してダムサイトより下流ではSSおよび濁度から算出される浮遊粒子流砂量のピーク値が半減しているが、その理由として浮遊成分が貯水池に沈降したことが推測される。

図-8ではSSから算出された浮遊粒子流砂量と流量の関係を観測地点毎に異なった記号で表している。ダムサイトと放流口の地点における浮遊粒子流砂量と流量の関係の時間変化に注目するとループを描いていることがわかる。ダムサイトおよび放流口以外の地点においては流量と浮遊粒子流砂量は一価関係にある。ここでダムサイトと放流口のデータを除いたデータに関して指数式で最小自乗式をあてはめると、

$$Q_s = 7.8 * 10^{-7} Q^{2.06} \quad (7)$$

となり全国河川のWash Loadの推定式<sup>10)</sup>の範囲( $Q = 4 * 10^{-8} \sim 6 * 10^{-6} Q^2$ )に入っている。

図-8を各観測地点別に分けて示したのが図-9であり、黒丸はSSデータを流砂量に換算して得られる浮遊砂粒子流砂量の実測値、図中の実線は次章で述べる数値計算結果による浮遊粒子流砂量をそれぞれ縦軸に、横軸には流量をとったものである。ここで数値計算によって得られる浮遊粒子流砂量については次章で詳しく述べるが、粒径0.074mm以下の流砂量(土質工学分類上

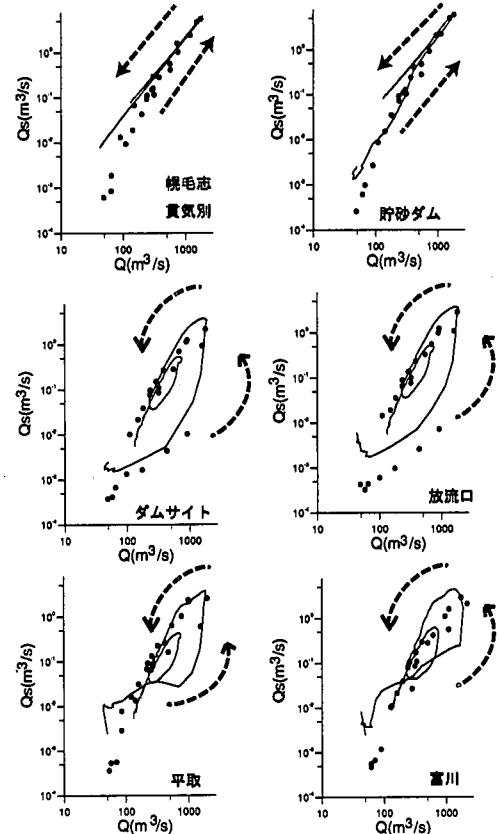


図-9 流量とSSによる浮遊粒子流砂量の関係(観測地点別)  
(1997年8月9日12時～15日12時)

表-3 出水期間中(1997年8月9日12時～15日12時)の各地点のSSによる通過浮遊粒子流砂量およびその収支  
単位:(1,000 m³)

地点	富川	平取	ダム	貯砂ダム	島毛志・貢気別
流砂量	182	148	135	128	141・110
区間	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5
収支		-34	-13	97	26

細粒分とされるもの)とする。

貯砂ダム上流および貯砂ダム地点では流量と浮遊粒子流砂量はほぼ一価関係にあり、一般河川において言われているような濁質のピークが流量のピークに先行して現れる現象はほとんど見られない。貯水池下流端であるダムサイト地点においては、上昇期には流量の上昇に対して流砂量の上昇は遅れているが、下降期には他の地点とほぼ同じ流量・浮遊粒子流砂量の関係に一致する傾向が現れている。これは出水期間中には流入=放流のダム操作が行なわれたが、貯水池に流入する濁質が貯水池末端に届くのにある程度時間を要したためである。また放流口における浮遊粒子流砂量もダムサイト



図-10 貯水池内の濁度・SSの観測結果（1997年8月10日および13日）

とほぼ同じ変化を示していることから、放流ゲートが貯水池下流端の濁質をほぼ完全に放流していたと考えられる。またダムサイトから約3km下流の平取地点においては浮遊粒子流砂量が遅れる傾向はまだ少し残っているものの、河口付近の富川地点においては殆ど消えており貯水池上流のような一価関係に近い形に戻っている。図中の実線は後に述べる数値計算結果を示したものであり、貯砂ダム上流の流量と浮遊粒子流砂量の一価関係やダムサイトおよび放流口の流砂量が遅れる現象も表せている。

各地点で推定されたSSから算出した浮遊粒子流砂量を図-7に示した期間（1997年8月9日の12時から15日の12時）で積分することにより出水期間中の各地点の流砂の通過量の推定を行なったもの、およびこれらの値の区間毎の収支（上流地点の通過量の累計－下流地点の通過量の累計）を表-3に示す。この収支によると、貯砂ダムの上流区間で約+26,000 ( $m^3$ )、貯水池内で約+97,000( $m^3$ )となり、いづれも大量の堆積傾向となっている。ここで注意を要するのは、これらの値はあくまでもSSデータから算出した水表面付近を通過する流砂量であるため、土砂収支の全量を表しているわけではないということである。

## (2) 船による貯水池内の移動観測

同じ出水期間中の図-6の流量ハイドログラフで線が太く表示されている時間帯において貯水池内の流心附近を船で縦断方向に移動することにより採水および流速の測定が行われた。なお、船による観測は流量の上昇期はいずれも夜間であるうえに、大量の流木等に阻まれ非常に危険であったため、時間・空間的に連続的な観測は流量の下降期のみ行なわれた。採水は水深方向に3~5点、各点約1ℓづつ行われ、試料に対してSS、濁度および粒度分析が行なわれた。採水にはMTS(Multi-Tube Sampler)式の採水器を用いたが、これは容器の蓋に取り付けられているチューブの圧力変化によって蓋の開閉を行い採水できる仕組みとなっているものである。

図-10に貯水池内のSS・濁度の観測結果を示す。各図の縦の列はある時間帯における一連の観測結果を観測地点別に並べたものであり、観測時間および観測時間中の平均貯水池流入流量と共に示す。また横の列は観測地点を別に上流地点から下流地点へと並べたものであり、各図の上部に示すXの値はダム地点から上流へ向かった距離である。各図の縦軸は観測地点の水深、横軸はSSまたは濁度を表わし、黒丸(●)はSS( $mg/\ell$ )、白丸(○)は濁度である。

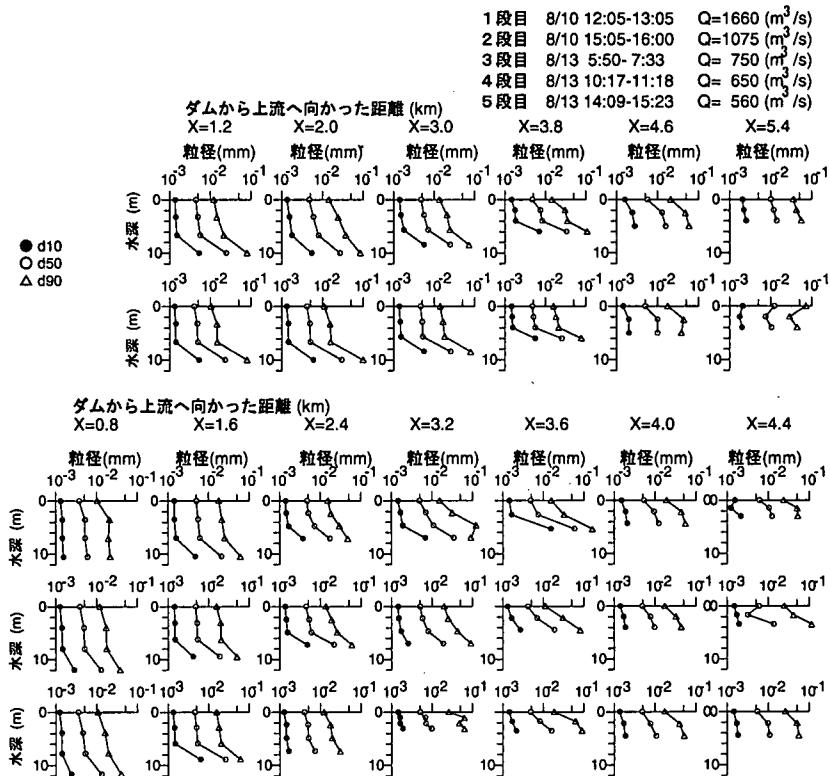


図-11 貯水池内の流砂の粒度分析結果（1997年8月10日および13日）

なお、図-10には次章で述べる数値計算結果（水深平均の総浮遊砂濃度に対して仮定された指数型の濃度分布式から得られた浮遊粒子流砂の濃度分布）も併せて示してある。濁度とSSの関係は前記の定点観測の場合と同様に、全体的にSSの値が濁度の値を上回る傾向が見られる。上流では濃度分布が深さ方向に比較的一様な分布となっているのに対して、下流に行くに従って河床近傍が極端に高濃度となる傾向が見られる。河床近傍のデータは、採水時に貯水池の底泥が混入した可能性もあるため注意を要する。しかし河床近傍を除けば大局的には濃度分布が指数分布にほぼ一致する傾向が見られる。

粒度分析は採水試料をコールターカウンターにかけることによって得られ、結果を図-11に示す。ここで、黒丸（●）は  $d_{10}$ （10%粒径）、白丸（○）は  $d_{50}$ （50%粒径）、三角（△）は  $d_{90}$ （90%粒径）である。採水試料中に含まれる粒子は貯水池流入部や河床付近でも非常に細かく平均粒径で 0.01mm 以下の微細な粒子であった。各粒径は河床付近が水面付近に比べ約 1 オーダー程度大きな値となっており、また流下方向（堤体に近い）ほど小さくなる傾向が見られる。採水試料の粒度分析結果によれば、貯水池内に流入する流砂の平均粒径は流入流量ピー

ク時で約 0.01mm 程度であるが、ダム地点の平均粒径は 0.005mm 程度と極めて細かくなっている。表-3 の通過 SS 量の收支結果と考え併せると貯水池ダム地点を通過した流砂のうち粗い粒径のものから徐々に沈降していき、ダム地点では残った細かい粒径の流砂が放流水と共にダム下流へ放流されたと考えられる。

流速の観測は、8月10日の観測では ADCP(RD Instrument 社製、1200Hz) を用いて行われたが信頼性のあるデータは得られなかった。これは貯水池底面が流動状態であったために安定した反射波が得れなかったことによると考えられる。8月13日の観測では 3 次元の電磁流速計(アレック社)を用いることにより安定した計測を行なうことが出来た。

図-12 は各地点の水深方向の流速分布を示したものであり、図中の黒丸は図-10、11 の採水と同時に観測された実測値である。これによると貯水池の上流部では表面流速が速く、下流に行くに従って深さ方向に一様化する傾向が見られる。ダムに近い地点では河床付近の流速が大きくなっているが、これは河床付近に設置されている放流ゲートにより加速されていることによると考えられる。ここでも図中には次章で述べる流れと流砂・河床変動の計算によって得られる水深平均流速に対数

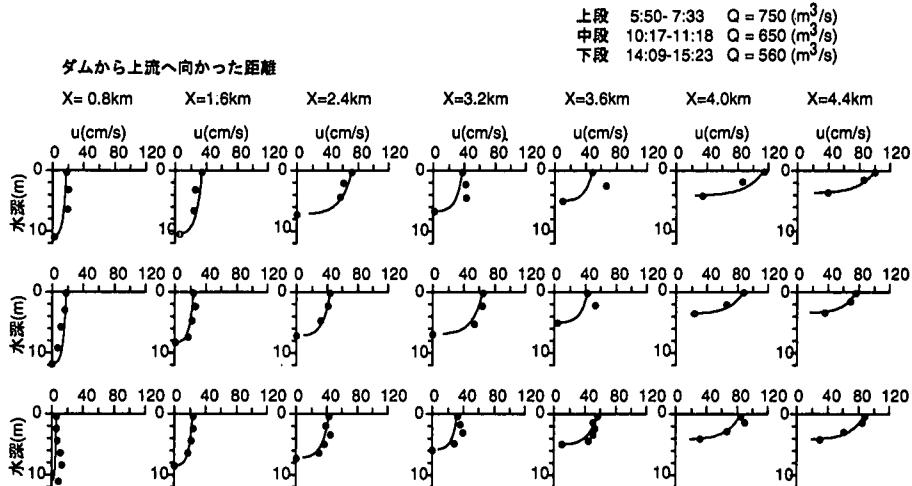


図-12 貯水池内の流速分布の観測結果（1997年8月13日）

則を仮定して得られる水深方向流速分布を示しているが、放流ゲート近傍を除けば流速分布は対数則ではほぼ近似可能である。

以上の観測結果により出水時の貯水池内の流速分布および浮遊砂濃度の分布等が明らかとなった。また貯水池内のSSデータとして観測される流砂の平均粒径が0.01mm以下であることやその通過量などが確認されたが、河床材料と交換されながら通過する流砂(Bed Material Load)についてはまだ明らかになっていない。そこで次章に示す数値計算モデルを用いてBed Material Loadの質および量を算定する。

#### 4. ダムを含む沙流川の流砂と河床変動の数値計算(96.4~97.12)

前章の出水期間中の観測結果によりダムを含む河川の土砂輸送の実態を把握した。しかしながら、ダムや河川の管理上、貯水池や河道を流下・堆積する土砂の量や質(粒径)を長期的に予測することが必要であり、モデルの確立が急務となっている。本章においてはダムおよびこの上下流の流れと流砂・河床変動の計算モデルを用いてダム完成時から前章で述べた出水期間を経て、堆積量調査等が行われた1997年12月までの1年9ヶ月間の計算を行い、調査結果と比較することによってモデルの検討を行う。

計算モデルは基本的に清水<sup>11)</sup>による1次元の河床変動計算法を用いる。本研究において流砂を表-4のように分けて扱うものとする。モデルでは従来の河床材料から計算される流砂B.M.L(Bed Material Load)に加えて、W.L(Wash Load)を組み入れた。

一般に河川においてはWash Loadは河床とは交換さ

表-4 流砂の分類

B.M.L .....	河床に存在する大きさの粒子からなる流砂
扱流砂	河床上を転動、滑動、跳躍して移動する流砂
浮遊砂	流水中を浮遊状態で輸送される流砂
W.L .....	河床構成材料に見られない微細な流砂

れることなく通過するものと考えられるが、ダムなどによって水や流砂の流れが遮られる場合にはその堆積を考慮する必要がある。従って、このモデルではWash Loadを上流端で流量との相関式によって与え、計算区内では最小粒径の浮遊砂として扱うこととする。

##### (1) 基礎式

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<sup>12)</sup>、浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式<sup>13)</sup>、浮遊砂の沈降速度はRubeyの式を用いる。

ダム貯水池内での非常に非定常性の強い現象を扱うために粒径別浮遊砂濃度の連続式で次式に示すとおり、左辺第1項の濃度の時間変化の項および右辺第4項の拡散項を考慮する。

$$\frac{\partial}{\partial t}(< c_i > h) + \frac{1}{B} \frac{\partial(Q < c_i >)}{\partial x} = q_{su,i} - w_{f,i} c_{bi} + \frac{q_x < c_{xi} >}{B} + D_s \frac{\partial^2(< c_i > h)}{\partial x^2} \quad (8)$$

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、 $q_{su,i}$ は粒径別浮遊砂の単位面積当たりの浮上量、 $w_{f,i}$ は粒径別浮遊砂の沈降速度、 $q_x$ は横流入流量、 $D_s$ 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、 $< c_{xi} >$ は水深平均の粒径別横流入浮遊砂濃度である。 $c_{bi}$ に関しては、水深方向の濃度分布に

次式の指数型の濃度分布を仮定し、

$$c_i = c_{bi} \exp(-\beta\xi) \quad (9)$$

ただし、 $c_i$  は粒径別浮遊砂濃度、 $\beta = w_{fi}h/\varepsilon$ 、 $\xi = z/h$ 、 $\varepsilon = \kappa u_* h/6$ 、 $z$  は河床からの鉛直上方向の距離、 $\kappa$  はカルマン定数 (= 0.4)、 $u_*$  は摩擦速度である。これをこれを水深方向に積分した次式、

$$\langle c_i \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h c_i d\xi = \frac{c_{bi}}{\beta} (1 - \exp(-\beta)) \quad (10)$$

により、式 (8) 中の  $\langle c_i \rangle$  と  $c_{bi}$  の関係を与えることとした。また、水深平均の粒径別横流入浮遊砂濃度  $\langle c_{xi} \rangle$  は本来であれば支川毎の流入浮遊砂濃度を与えるべきであるが、図-7 から分かるように地点別の流量ハイドログラフの違いは非常に少なく、従ってこの区間における支川からの流入流量はごく僅かであることも考慮して、ここでは  $\langle c_{xi} \rangle$  は本川の濃度  $\langle c_i \rangle$  に等しいと仮定して与えることとした。

## (2) 計算条件

計算は水位データの得られる最下流端である富川地点から貯砂ダムの上流地点までの約 30km 区間を 400m 間隔に分割して行うものとする。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、計算の便宜上沙流川と額平川を合わせて見かけ上一本の河川として扱う。計算流量として貯砂ダム上流とダム地点と平取地点の実測データを用い、各地点の間では次式で表わされる横流入流量を考慮する。

$$q_x = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (11)$$

ここで  $x$  は流下方向距離である。計算水位は富川地点、平取地点および二風谷ダム地点で実測データを与え、貯砂ダム地点では流量から限界水深を求ることによって与える。

$$h_c = (Q^2/gB^2)^{1/3} \quad (12)$$

これは貯砂ダム地点で水が通過する時にフルード数がほぼ 1 に近い値となっていることによる。

流砂は表-5 に示される 11 のクラスの粒径に分割して粒径番号  $i$  をつける。図-12 の浮遊成分の粒度分析結果、浮遊成分の平均粒径が 0.01mm 以下であったことを踏まえ、Wash Load 成分の代表粒径を 0.01mm とする。本来 Wash Load は河床と交換されないという流れの形態によって定義されるべき流砂であるが、本研究対象区間のようにダムの貯水池などを含んでいる区間内では河床と交換され得る。このようなことを考慮した上で、数値計算において 0.01mm の流砂を Wash Load であると定める。ただし、Wash Load は初期の河

表-5 数値計算に用いる河床材料の粒径区分

:単位 (mm)

i	粒径の範囲	代表粒径	流砂の粗類	土の粗類
1	~0.01	0.010	W.L	細粒分 (浮遊粒子流砂)
2	0.01~0.074	0.050	B.M.L	細粒分 (浮遊粒子流砂)
3	0.074~0.2	0.137		砂分
4	0.2~0.4	0.3		砂分
5	0.4~1.0	0.7		砂分
6	1.0~2.0	1.5		砂分
7	2.0~4.0	3.0		砾分
8	4.0~10.0	7.0		砾分
9	10.0~20.0	15.0		砾分
10	20.0~40.0	30.0		砾分
11	40.0~	70.0		砾分

床材料中には存在しないものと仮定し、上流端から流量との関係式によって与えるものとする。この関係式は出水時観測による上流端地点（幌毛志・貫気別）の SS から算出した浮遊粒子流砂と流量の関係から求めたものである。

$$Q_s = 1.39 * 10^{-6} Q^{2.02} \quad (13)$$

また、Bed Material Load は上流端で動的平衡状態であると仮定し、貯砂ダム地点およびダム地点では計算区間内では河床材料から計算する。ここで初期河床材料の各粒径の存在割合は、ダム完成前の河口からダム地点までの区間の 10, 50, 90% 粒径（図-5 参照）の近似式 (3)～(5) をもとに対数正規分布を仮定して与える。ダム上流区間においてもダム下流区間から求めた近似式をもとに計算を行なったが、これはダム建設の影響を受けていない状態の初期条件を想定するためである。

初期平均河床高および低水路幅は、河口からダム地点までは 1992 年の実測データを、ダム地点から上流は 1996 年のデータをそれぞれ与える。

## (3) 数値計算結果

このモデルでは河床材料から流砂を計算する河床変動計算に Wash Load の計算を考慮に入れている。この Wash Load の計算法の妥当性の検証のために、前章の図-7 に出水中に各地点における浮遊粒子流砂量の計算結果を観測結果と共に示す。黒丸は観測による SS データから算出された浮遊粒子流砂量、白丸は観測による濁度データから算出した浮遊粒子流砂量、実線は計算による浮遊粒子流砂量である。図より浮遊粒子流砂量の計算値が SS 観測から得られる通過流砂量とほぼ対応することが分かる。

また前章の流量と浮遊粒子流砂量との関係を示した図-9 では、浮遊粒子流砂量の計算値が SS から算出した浮遊粒子流砂量に相当するものとして実線で示されている。観測データと同様にダムサイト地点および放流口において流量の上昇期における流砂量の上昇の遅れの傾向が現れている。

表-6 沙流川の土砂通過量の累計および堆積量（1996.4～1997.12）

：単位 (1,000 m<sup>3</sup>)

通過地点	富川	平取	ダム	貯砂ダム	上流端
Wash Load 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

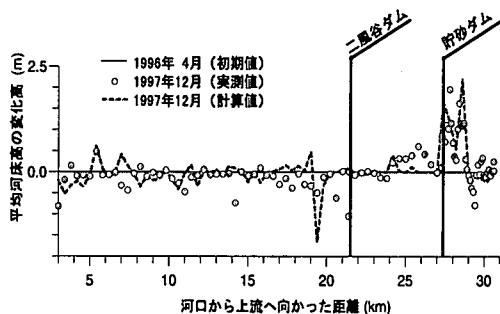


図-13 平均河床高の縦断方向形状の変化(1996年4月を基準として表示)

貯水池内の濁度・SS の水深方向分布の図（図-10 参照）では、計算による浮遊粒子の濃度分布を実線で示した。これは河床付近の濃度と平均濃度の計算結果を用いて指数分布を仮定することにより算出したものである。

同様に貯水池内の流速の水深方向の分布の図（図-12 参照）の中で実線で示された計算値は、計算結果の水深平均流速に対数則を仮定して得られたものである。このように計算モデルから算出した値を実測値と比較した結果、計算により実際の水の流れや浮遊成分の移動が的確に表せることが示された。

同様にして1996年4月から1997年12までの計算を行い、河床高の変化および河床材料の変化などを算出した。

図-13 は初期河床高を基準として変化量を表したものであり、ダム下流では1992年、ダム上流では1996年の平均河床高データをそれぞれ基準値として、1997年の実測結果および計算値を示している。図中の実線は初期値であり、破線は計算値、黒丸は実測値である。ここで  $K_{p0} \sim K_{p19}$  における河床低下、 $K_{p21.4} \sim K_{p30.4}$  における堆積が計算されており、その形状および高さは実測値とほぼ一致している。ただし、Kp19.6 地点では局所的に実測値より大きな洗掘が計算されている。この原因は、この地点は低水路幅が上下流より極端に狭く、固定堰が設置されている地点であるのに対して、計算上は低水路幅は狭く与えているが、固定堰の影響は考慮していないためであると思われる。

図-14 は河床材料の粒径変化の計算結果を実測値と

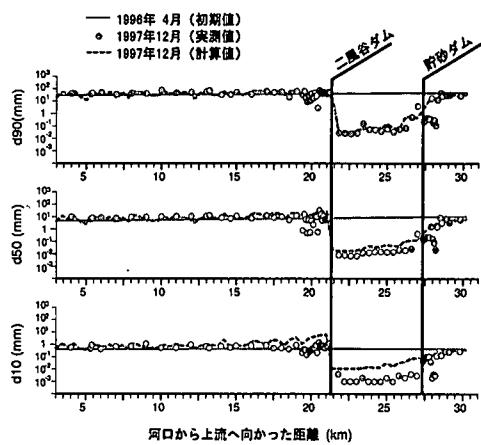


図-14 河床材料の縦断方向分布の変化

併せて示したものであり、上から順に 90% 粒径、50% 粒径、10% 粒径を示している。実線は式(3)～(5)で示される初期値、破線は計算結果、黒丸は実測値を表している。実測値より出水後の堆砂に伴うダム貯水池内の粒径の細粒化、ダム下流区間の河床低下に伴う粗粒化がみられ、この傾向は計算によっても表されている。貯水池内区間における 10% 粒径の計算値が実測値と比較して大きいが、これは計算で用いている最小粒径の大きさが 0.01mm であるという限界があるためである。

1996年4月から1997年12までの土砂通過量の累計をそれぞれの区間毎成分別に表-6に示す。上から Wash Load、浮遊砂、掃流砂、全流砂の計算結果を示す。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。表-6より掃流砂は、大部分が貯砂ダム上流区間で堆積し、残りもダム貯水池内で堆積するため、ダム地点を通過出来ないことが分かる。浮遊砂の場合は、ほとんどが貯砂ダム地点を通過した後に貯水池内に堆積している。Wash Load は貯砂ダム上流を通過後、その一部のみが貯水池内に堆積している。Wash Load の通過量は非常に大きいため、貯水池内の堆砂全体に占める割合も大きい。このように貯砂ダム上流区間での堆積の大部分が掃流砂であり、貯水池内での堆砂は浮遊砂および Wash Load によるものであることが計算により示され、これは粒径の実測結果（図-14 参照）からも裏付けされている。

なお、ここで示した計算は1996年4月から1997年12までの比較的短期間のものである。本来、ダムを含む河道の流砂量およびその質、河床高や河床材料の変化についての検討は、ダムの影響がより明確に現れる10年～20年という長期間で行うべきではある。しながら本研究の対象である二風谷ダムは1996年4月

完成であり、長期間の計算を行う場合にはダム建設中の影響も考慮しなければならず、境界条件などの設定が難しいことや、ダム建設前の貯水池上流の河道データが明らかでないことなどの理由により、計算対象期間は境界条件などが明確なダム完成後のみとしたものである。

## 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の通過流砂量および河床変動・河床材料の変化について検討を行った。ダムを含む広範囲にわたる区間の測量データ、極めて規模の大きな出水時の連続観測および数値計算から得られた知見を以下に挙げる。

1) ダムの完成後僅かな期間しか経過していないために必ずしも明確ではないが、測量結果からダム上流区間での流砂の堆積と河床材料の細粒化、ダム下流での洗掘による平均河床高の低下と河床材料の粗粒化など、明らかにダムの影響と思われる現象が確認された。

2) 1997年8月の出水期間中の各定点観測地点のSSデータによる通過土砂量の累計から、流砂は貯砂ダム上流区間で一部堆積し、その後半分近くが貯水池に堆積し、ダム地点に到達した土砂はそのままゲートから流出していることが明らかになった。

3) 貯水池内の観測から、河床付近では表面付近よりも大きな粒径の流砂が大量に通過していること、貯砂ダム地点を通過した粗い粒径の流砂は徐々に沈降し、細かい流砂はダム地点で放流されることが分かった。

4) 数値計算モデルを用いて出水期間中計算を行った結果、浮遊粒子の通過量によって通過SS量を再現出来た。

5) 1996年4月から1997年12月までの河床の変化の再現計算により、各区間で堆積、洗掘する土砂の質と量が明らかになり、貯砂ダム上流の堆砂のほとんどが掃流砂、ダム貯水池内の堆砂の多くが浮遊砂およびWash Loadに起因していることが分かった。

本論文では、過去の測量結果および大出水中的連続的な観測結果と共に、Wash Loadを組み込んだモデルを用いた数値計算結果を示した。この結果、ダム貯水池を含む河川の流砂の質、量および移動形態が明らかになり、貯水池および河川管理上貴重な情報を提供することが出来た。

## 参考文献

- 1) 室田明、端野道夫：“貯水池堆砂量の推計についての試案”，水工学論文集第10巻, pp.49-54, 1966.
- 2) 芦田和男、奥村武信：“ダム堆砂に関する研究”，京都大学防災研究所年報 第17号B(抜粋集), 1974.
- 3) 河田恵昭、植木実：“ウォッシュロードの堆積を考慮した貯水池堆砂の実用計算法について”，水工学論文集, 第40巻, pp.983-988, 1996.
- 4) 河村三郎、D.B. サイモンズ：“大ダム下流の河床低下”，水工学論文集第11巻, pp.31-36, 1967.
- 5) 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, pp.1039-1044, 1998.
- 6) 藤田光一、山本晃一、赤堀安宏：“勾配・河床材料の巨変点を持つ沖積河道縦断形の形成機構と縦断形変化予測”，土木学会論文集, No. 600/I-44, pp.37-50, 1998.
- 7) 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, pp.641-646, 1995.
- 8) Robert H. Webb, John C. Schmidt, G. Richard Marzolf, Richard A. Valdez, (Editors): “The Controlled Flood in Grand Canyon”, Geophysical Monograph Series, Volume 110, 1999. 368 pages, hardbound, ISBN 0-87590-0933, AGU code GM1100933. AGU.
- 9) 坊野聰子、清水康行、斎藤大作、吉田義一、黒木幹男：“出水時のダム貯水池における濁質観測”，水工学論文集, 第42巻, pp.715-720, 1998.
- 10) 土木学会：水理公式集, pp.230, 1980.
- 11) 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.
- 12) 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.59-69, 1972.
- 13) Itakura, T. and Kishi, T.: “Open channel flow with suspended sediments.” Proc. of ASCE, HY8, pp.1325-1343, 1980.

(1998.12. 7 受付)

# SEDIMENT TRANSPORT AND BED EVOLUTION OF RIVER WITH DAM

Satoko BOUNO, Yasuyuki SHIMIZU, Mikio KUROKI, Mutsuhiro HUJITA and  
Yoshikazu YOSHIDA

The purpose of this paper is to study the effect of dam construction on the middle reaches of alluvial rivers. The Nibutani dam was constructed on the Saru River, 21.4km upstream of its mouth in 1996. In this paper, the flow and sediment transport system is studied along the Saru River including field resoluts from the Nibutani dam and its reservoir. The sediment transport rate, bed material distribution, and bed elevation changes were investigated before, after and during a flood. A numerical model to predict the sediment transport rate and river bed changes are proposed and verified using the data obtained by field measurements. This study clarifies the effect of the dam on the river, and many useful information for river and dam management works are obtained.