

II - 60

# 沙流川の流砂について

北海道大学大学院 学生会員 坊野聡子  
 北海道大学大学院助教授 正会員 清水康行  
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 斎藤大作

## 1 はじめに

本研究はダム堆砂の防止および軽減の一策として設けられた貯砂ダムの機能の評価を行なったものである。ダム堆砂はダム貯水池機能の低下のみならず、ダム上流下流の河床高および河床材料の変化を引き起こすため問題となっているが、未だ有効な対策は確立しているとはいえない。そこで沙流川二風谷ダムを対象とし、過去の測量データおよび出水期間中の観測結果等を検討した上で数値計算モデルを作成し、貯砂ダムの有無による河床変化の違いの予測を行なった。このことにより、貯砂ダム建設がダム貯水池内の堆砂の形状および河床材料の粒径の変化に与える影響等が明らかとなった。なお研究は次のような手順で行なうものとする。

- 1 過去の測量結果の検討
- 2 出水期間中の観測結果の検討
- 3 観測結果に基づいた数値計算の検討
- 4 貯砂ダムの有無による計算結果の違いの比較検討

また、本研究では貯水池に流入する流砂を防止する目的でダム貯水池上流に設置されている貯砂ダムの効果を検討するために、計算上貯砂ダムがある場合と無い場合の2通り実施し、その違いを明らかにする。

## 2 対象区間の河道特性量の変化

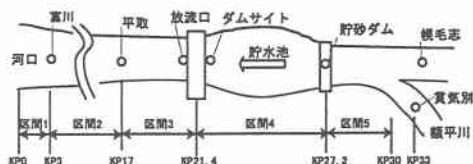


図-1 沙流川の模式図 (○は観測地点)

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。図中に黒丸で示す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 (KP 0.0-3.0)          |
| 区間2 | 富川地点から平取地点 (KP 3.0-17.0)       |
| 区間3 | 平取地点から二風谷ダム地点 (KP 17.0-21.4)   |
| 区間4 | 二風谷ダム地点から貯砂ダム地点 (KP 21.4-27.2) |
| 区間5 | 貯砂ダム地点から上流 (KP 27.2-30.6)      |

ここで、KPは河口からの距離(km)を表す。検討対象区間において過去20年間、横断測量および河床材料調査が行われてきた。これらのデータを用いて、対象区間の平均河床高および河床材料の近年の変化を示す。

Sediment Transport in the Saru River  
 by Satoko Bouno, Yasuyuki Shimizu and Daisaku Saitou

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面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（プラスは上昇、マイナスは低下を表す）で表示したのが表-1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のは建設のための仮締め切りなどが完成の10年以上前から開始されてダムの影響がダム完成以前から生じていたためと推定される。1978年から1982年にかけての変化量が大きいのは、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379,400(m<sup>3</sup>)、貯砂ダム上流では約281,900(m<sup>3</sup>)の堆砂が見られる。

表-1 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

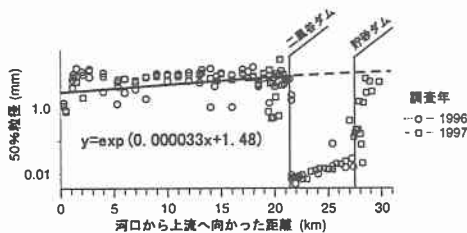


図-2 河床材料 (50% 粒径) の縦断方向分布

図-2はダム完成後に調査された河床材料の50%粒径を縦断的に示したものである。図中の数式はダム下流区間における1996年のデータを包絡する近似式である。図-2より、下流から上流へと河床材料の粒径が粗くなっていることが分かる。ダム上流区間では粒径が極端に細粒化する傾向が見られる。

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。

### 3 1998年8月の出水時の観測結果

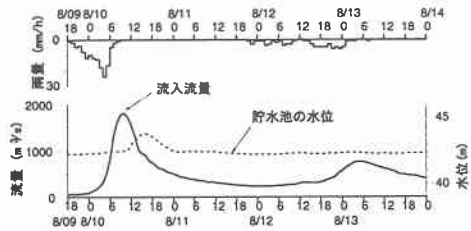


図-3 出水期間中(1997年8月9~13日)の時間雨量、流量及びダム貯水位

ダムおよび貯砂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、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。

沙流川水系において1997年8月10日から13日にかけての集中豪雨により、二風谷ダム地点ではピーク流入流量が約1,800m<sup>3</sup>/sに達した。これは観測史上第3番目、ダム完成後では最大規模の出水である。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-3に示す。

この出水期間中、図-1に白丸(O)で示された7地点[幌毛志、糞気別、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、採水された資料を基にSuspendedSolids(SS)および濁度の分析が行われた。ここで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り、濁度は光の透過度によって計測されたものである。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行う。

$$Q_s = \frac{QS}{w_s 1000^2} \quad (1)$$

ただし、 $Q_s$ は流砂量(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>)である。浮遊粒子の単位体積重量を $w_s = 2.65(g/cm^3)$ と仮定し、7地点の各観測時のSSおよび流量から(1)式で流砂量を推定して流量との関係を観測地点毎に異なった記号で表しているが、ダムサイトと放流口のグループとこれ以外のグループで異なった傾

向が見られる。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、

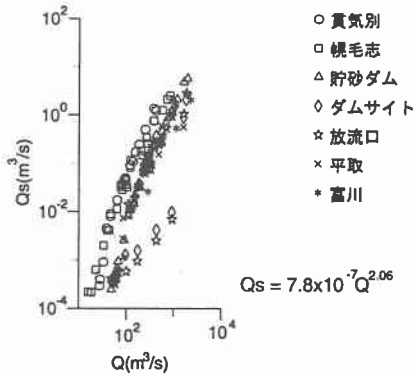


図-4 出水時定地点観測全データによる流量とSSから算出した流砂量との関係

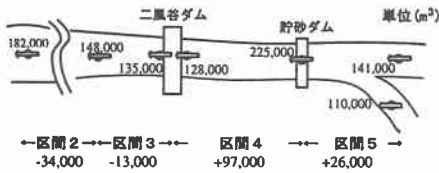


図-5 1997年8月9日12時～15日12時の各地点のSSによる流砂量およびその収支

$$Q_s = 7.8 \times 10^{-7} Q^{2.06} \quad (2)$$

となり全国河川のWash Loadの推定式<sup>1)</sup>の範囲( $Q_s = 4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6} Q^2$ )に入っている。このことからSSデータとして観測される流砂のほとんどがWashLoadに相当すると考えられる。

各地点で推定されたSSから算出した流砂量を1997年8月9日の12時から15日の12時までの期間で積分することにより推定された出水期間中の各地点の流砂の通過量、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)を図-5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<sup>3</sup>)、貯水池内で約+97,000(m<sup>3</sup>)となり、いず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水表面付近を採水することによって得られたものであるため、河床付近を流れる粒径の大きな流砂は含まれていないということである。平均河床高および河床材料の変化を考える上で、

このような河床付近を移動する流砂は無視することが出来ない。そこで、出水期間中のSS観測結果を表面付近通過する流砂の条件として組み込んだ数値計算モデルを用い、全ての流砂の移動を調べる。

## 4 出水期間中の流砂と河床変動計算

前章の出水期間中の観測結果によりダムおよび貯砂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。本章においては流れと流砂・河床変動の計算モデルを用いて出水期間中の計算を行い、調査結果と比較することによってモデルの検討を行う。また貯砂ダムが建設されている場合とされていない場合の両方の条件で計算を行なうことによって貯砂ダムの影響を予測する。

計算モデルは基本的に清水<sup>2)</sup>らによる1次元の河床変動計算法を用いる。モデルでは従来の河床材料から計算される掃流砂・浮遊砂(Bed Material Load)に加え、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、このモデルでは上流端地点においてWash Loadを観測結果に基づいた流量との相関式によって与え、計算区間内では最小粒径の浮遊砂として扱うこととする。

### 4.1 基礎式

流れの基本式は1次元定常流の運動方程式、掃流砂量式は次式の芦田・道上の式<sup>3)</sup>、浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式<sup>4)</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通り、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。

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle c_i \rangle + \frac{1}{B} \frac{\partial(Q \langle c_i \rangle)}{\partial x} = q_{sui} - w_{fi} c_i + \frac{q_x \langle c_{xi} \rangle}{B} + D_s \frac{\partial^2 \langle c_i \rangle}{\partial x^2} \quad (3)$$

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,  $q_{sui}$  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,  $\langle c_i \rangle$  は水深平均の粒径別浮遊砂濃度,  $\langle c_{xi} \rangle$  は水深平均の粒径別横流入浮遊砂濃度であり  $\langle c_i \rangle$  と等しいと仮定する.

## 4.2 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.

$$q_x = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (4)$$

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, 貯砂ダムがある場合の計算は流量から限界水深を求めて与える.

$$h_c = (Q^2/gB^2)^{1/3} \quad (5)$$

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.

表-2 数値計算に用いる河床材料の粒径区分

粒径の範囲	代表粒径	流砂の種類
0.01 ~ 0.03mm	0.010mm	WashLoad
0.03 ~ 0.074mm	0.074mm	
0.074 ~ 0.2mm	0.137mm	
0.2 ~ 0.4mm	0.3mm	Bed Material Load
0.4 ~ 1.0mm	0.7mm	
1.0 ~ 2.0mm	1.5mm	
2.0 ~ 4.0mm	3.0mm	
4.0 ~ 10.0mm	7.0mm	
10.0 ~ 20.0mm	15.0mm	
20.0 ~ 40.0mm	30.0mm	
40.0 ~ 100.0mm	70.0mm	

流砂は表-2に示すように Wash Load を考慮して 11 のクラスの粒径に分割する. Wash Load 成分の代表粒径は 0.01mm とする. また, Wash Load は初期の河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. 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 から算出した流砂と流量の関係から求めたものである.

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

また, Bed Material Load (掃流砂・浮遊砂) 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を含む計算区間内では河床材料から計算されるものとする. 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 (mm) の近似式 (7)~(9) 式をもとに対数正規分布を仮定して与える.

$$d_{10} = \exp(0.006kp - 0.96) \quad (7)$$

$$d_{50} = \exp(0.033kp + 1.48) \quad (8)$$

$$d_{90} = \exp(0.021kp + 3.45) \quad (9)$$

ここで,  $kp$  は河口からの距離 (km) である.

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.

## 4.3 数値計算結果

以上の条件で 1996 年 8 月 9 日から 15 日 12 時までの計算を行なった. 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 WashLoad の計算を考慮に入れている. この WashLoad の計算法の妥当性の検証のために, 前章の図-6 に貯砂ダム地点の出水時における通過流砂量の計算結果を観測結果から算出された単位時間当たりの流砂量と共に示す. 黒丸 (●) は観測による SS データから算出された流砂量, 白丸 (○) は観測による濁度データから算出した流砂量である. 実線は WashLoad(0.01mm) の通過量の計算値であり, 貯砂ダムの有無に関わらずその値は殆ど変化しなかった. 図より 0.01mm の流砂の通過量が表面採水による SS および濁度観測結果による通過流砂量とほぼ対応することが分かる.

図-7 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. 図中の実線は貯

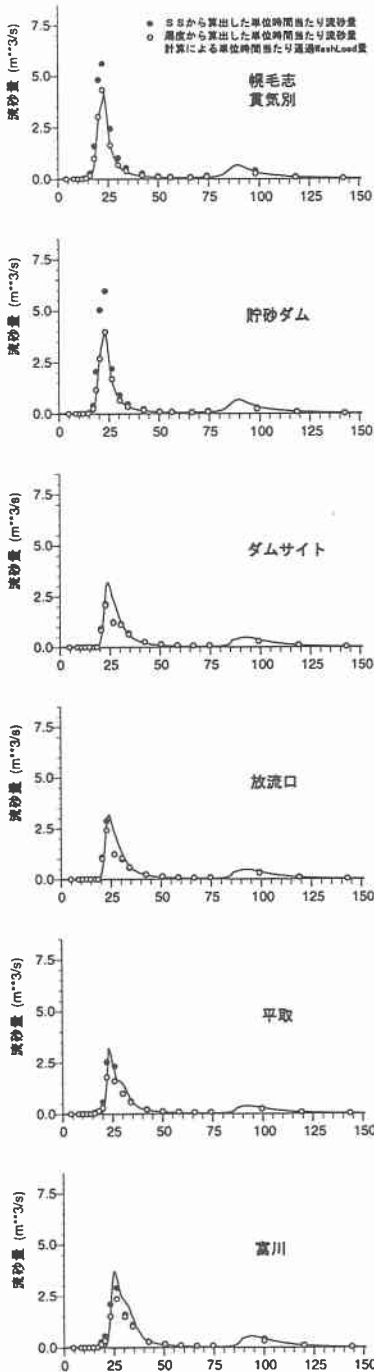


図-6 通過流砂量の時間的变化  
(1997.8/9 12:00 ~ 8/15 12:00)

砂ダムがある場合の計算値、破線は貯砂ダムがない場合の計算値、黒丸(●)は実測値である。計算値では実測値と同じようにダム上流区間における堆積およびダム下流区間における河床低下が見られ、実際の形状の変化をほぼ表せている。また貯砂ダムの有無によって、貯砂ダム上流地点付近の形状に違いが見られる。貯砂ダムがある場合は無い場合に比べて堆砂が上流区間に押し止められている状態となっていることが分かる。

図-8は河床材料の粒径変化の計算結果を実測値と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。図中の実線は貯砂ダムがある場合の計算値、破線は貯砂ダムがない場合の計算値、黒丸(●)は実測値である。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、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。ここでも貯砂ダムの有無による、貯砂ダム上流地点付近の粒径の違いが見られる。貯砂ダムがある場合に比べ貯砂ダムがない場合は貯砂ダム地点直下流区間の河床材料の粒径が粗くなる傾向が見られる。貯砂ダムにより貯水池内と貯砂ダム上流区間との河床材料の粒径分布の違いがより明確になる結果となることが分かる。

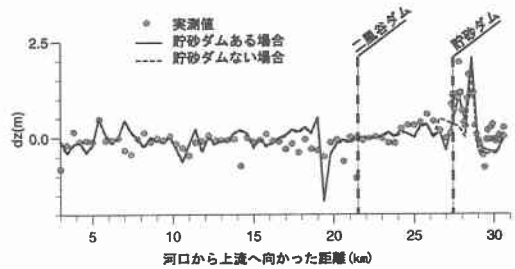


図-7 平均河床高の変化  
(1997.8/9 12:00 ~ 8/15 12:00)

それぞれの地点において、1997年8月9日12時から15日12時までの出水期間の各粒径流砂の通過量の累計を算出して表-3に示す。ここで上段は貯砂ダムがある場合の計算結果、下段は貯砂ダムがない場合の計算結果である。0.01~0.074mm程度の細かい粒径の流砂の場合、貯砂ダムの有無による違いは殆どない。しかしながら、粒径が大きな流砂の貯砂ダム地点における通過量は、貯砂ダムがある場合には貯砂ダムがない場

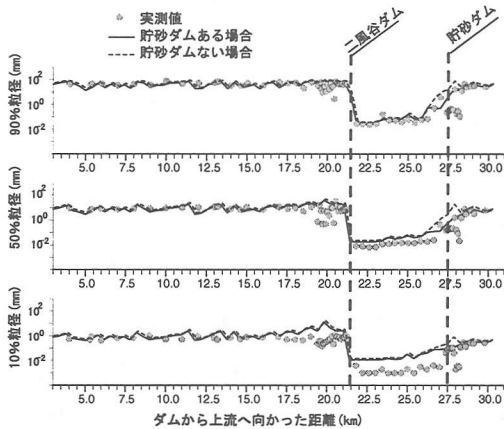


図-8 河床材料の変化  
(1997.8/9 12:00 ~ 8/15 12:00)

合に比べて少ないことが分かる。貯砂ダムにより粒径の大きな流砂が遮断されることが明らかとなった。またそれぞれの区間の収支を調べるとダム上流では堆砂、ダム下流では洗掘が起きていることが分かる。更にダム貯水池内の堆砂は貯砂ダム上流区間における堆砂に比べて細かい粒径の流砂から成っていることが分かる。このことは図-2の結果からも明らかである。

## 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列挙する。

- 1) 過去の測量結果からダム上流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の現象が確認された。
- 2) 数値計算モデルを用いて出水期間中計算を行った結果、採水によるSSデータから算出されて表面付近を通過する流砂量を、WashLoadの通過量によって再現することが出来た。
- 3) 0.01~0.074mm程度の細かい粒径の流砂の挙動に貯砂ダムの有無は殆ど影響を与えない。
- 4) 貯砂ダムにより、粒径の大きな流砂が遮断されることが明らかとなった。

表-3 1997年8月12時から15日12時までの各地点における土砂通過量の累計:単位(1,000 m<sup>3</sup>)  
上段:貯砂ダムあり, 下段:貯砂ダムなし

代表粒径 (mm)	通過地点				
	富川	平取	ダム	貯砂ダム	上流端
0.010	250.0	182.0	203.9	233.9	235.5
	250.2	182.4	204.2	234.1	235.4
0.074	10.6	3.4	0.5	152.2	159.6
	10.7	3.4	0.5	156.5	160.3
0.137	18.0	6.3	0.0	25.2	47.2
	18.0	6.3	0.0	41.0	47.6
0.3	9.0	5.3	0.0	0.9	14.9
	9.0	5.2	0.0	8.9	15.0
0.7	17.2	9.9	0.0	1.2	23.8
	17.2	9.9	0.0	14.3	24.1
1.5	16.4	9.3	0.0	0.8	20.7
	16.4	9.3	0.0	12.3	21.0
3.0	17.5	10.0	0.0	0.6	21.7
	17.5	10.0	0.0	12.7	22.1
7.0	25.1	13.5	0.0	0.4	27.0
	25.1	13.5	0.0	14.5	27.5
15.0	12.9	8.4	0.0	0.2	27.5
	12.9	8.4	0.0	13.0	28.0
30.0	5.7	2.5	0.0	0.0	16.0
	5.7	2.5	0.0	5.9	16.3
70.0	1.5	0.5	0.0	0.0	3.4
	1.5	0.5	0.0	16.3	3.5

5) 3) および4)の結果より、貯砂ダム建設によってダム貯水池内の堆砂は細かい粒径、貯砂ダム上流区間の堆砂は粗い粒径というようにその質の違いがはっきりとする傾向が現われることが明らかになった。

本論文では、WashLoadを組み込んだ数値計算モデルを用いて、ダムおよび貯砂ダムを含む河川を流れる流砂の挙動を明らかにした。また貯砂ダムのある場合とない場合とを想定した計算を行なうことにより貯砂ダム建設の影響を調べることが出来た。このことはダム堆砂に関する重要な知見となると確信する。

## 参考文献

- [1] 水理公式集土木学会, pp230, 1980.
- [2] 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”,
- [3] 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.
- [4] Itakura, T. and Kishi, T.: “Open channel flow with suspended sediments.” Proc. of ASCE, HY8, pp.1325-1343, 1980.