

沖積河川の土砂移動と変動

Sediment Transport and Bed Deformation in Alluvial Rivers

清水康行

Yasuyuki SHIMIZU

1. はじめに

一般に河川は降雨や融雪による流出水を山地から海域へと輸送する機能を担っているが、この「水」とともに大量の「土砂」をも輸送している。「水」の輸送問題に関しては、今までに降雨から流出、流下、海域への拡散までの各過程における物理機構に関する研究が進められており、その結果は河川計画における計画流量の決定や治水施設の設計などに反映されている。一方、「土砂」の輸送問題に関しては、流砂量、河床形態、河床変動、河道変化などに関する基礎的な研究は活発に行われているが、実際の河川計画には十分に反映されるには至っていないようである。単純な例で言えば、「石狩川から年間どの程度の土砂が海域に流れ出ているのか?」といった疑問にすらすらに答えられないのが現状である。河川の輸送する土砂量を定量的に把握し、「水」と同様に水系の「土砂」の実態を把握することは河川工学上重要な課題である。

河川による「土砂」の輸送は山地からの流出の後に、途中の河道内での堆積、再侵食などの河床変動を伴い、その時間的・空間的スケールも多種多様なものがある。河床波クラスの小規模なものから河川の水利・地形的影響に依存する砂州・河岸侵食・蛇行など中規模のもの、さらには河川構造物や河川改修の影響による大規模かつ長期間に及ぶものなどがある。

本テキストでは様々なスケールの河床変動のうち、特に実際の河川計画に最も影響を及ぼすと

考えられる大規模な土砂移動と河床変動に関して述べる。具体的には(1)北海道の石狩川を例とした大河川の長区間・長期間における河床変動と土砂移動、また(2)河川に大規模な横断構造物が建造された場合の例として北海道沙流川における検討結果を示すものである。

2. 石狩川の土砂移動と変動

河川流域で生産・輸送される土砂に関する研究は数多く行なわれており、最近の例では、杉本・真野¹⁾による細粒土砂の輸送に関する研究や、砂田・長谷川²⁾による河川水系全体での土砂輸送に関する研究などが挙げられる。しかしながら、前者の例では主として wash load を扱ったものであり、後者は bed material load の内の掃流土砂のみを扱ったものである。そもそも河川の輸送する土砂を wash load(河床材料に存在しないような微細粒径の土砂)と bed material load(河床に存在する大きさの粒子で河床材料と交換されながら輸送される)に明確に区別されるものではないが³⁾、石狩川のような大河川の河口からの総流出土砂量を議論する場合、この両者の違いを念頭に置いた扱いが必要である。

本テキストにおいては、現時点で入手可能なデータに基づき、上記の両者を含む石狩川の総流出土砂量の推定を行なおうとするものである。

2.1 濁度データと流砂量

石狩川においては1975年から基準地点の石狩大橋において自動水質監視装置(K-82S型)により濁度の自動監視(積分球式濁度計)が1時間毎

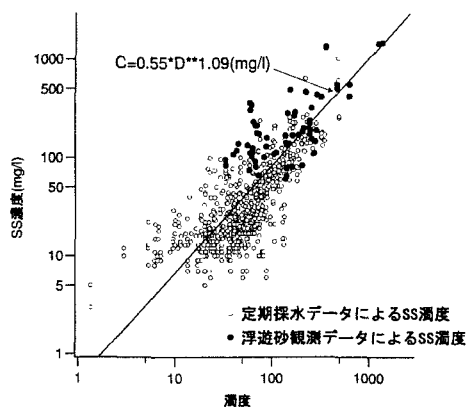


図-1 石狩大橋の濁度と土砂濃度の関係

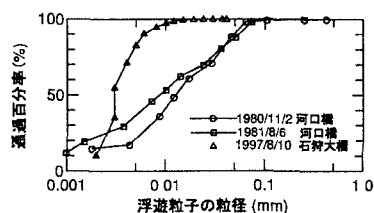


図-2 実測浮遊砂の粒径分布

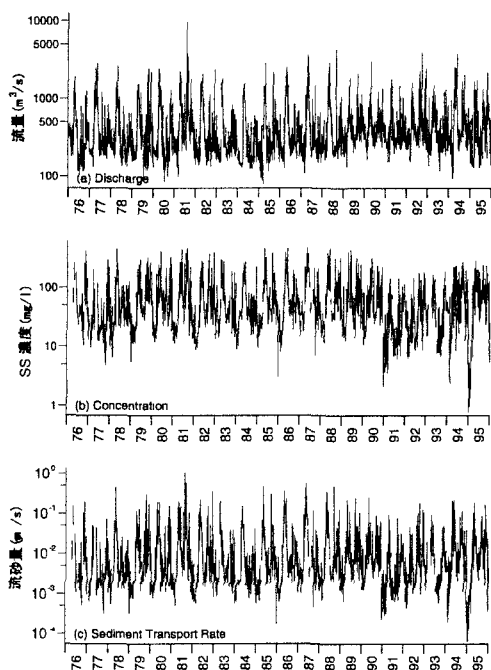


図-3 石狩大橋における1976～1995年の土砂濃度および流砂量

に連続的に行われている。石狩大橋地点は河口から約25kmに位置し、流域面積は石狩川の流域面積(14,330km²)に対して90%(12,697km²)を占めるため、石狩大橋地点の通過土砂量は、石狩川の生産土砂量の大部分を占めると考えられる。一方、この石狩大橋地点においては月2回、定期的にSS濃度の観測(バンドーン式採水器による表面から2割水深地点の採水)が行なわれているとともに、同地点およびその近傍の橋梁で1958年以来、出水中に約80回の浮遊砂観測(土研式浮遊砂採取器による断面内を分割して観測)が行われている。図-1は石狩大橋地点の過去20年間のSS濃度の観測値および浮遊砂の観測値から換算した浮遊砂濃度とそれぞれの観測日時における濁度データの相関関係を示したものである。ここで、白丸は採水によるSS濃度、黒丸は浮遊砂の観測値を濃度に換算したものである。

SSと浮遊砂データは観測方法或使用機器の違いから同レベルでの比較に多少の問題もあるが、両者ともに採取資料の大部分は図-2に示すように粒径が0.1mm以下の微細な成分であり、粒径から言えば大部分がwash load成分と考えられる。図-1によれば、濁度と土砂濃度には高い相関関係が見られ、図中に示す次式で近似可能である。

$$C = 0.55D^{1.09} \quad (1)$$

ただし、 C はSSおよび浮遊砂の濃度(mg/l)、 D は水質自動監視装置による濁度である。(1)式を用いることにより、連続的に観測されている濁度データから連続的な流送土砂の濃度の推定が可能となり、さらに流量データを用いることにより、流砂量の推定が可能となる。なお、ここでの流砂量は濁度・SSと流量から推定した流砂量であり、wash loadか浮遊砂かあるいはこの両者を含むものかは明らかでない。したがって、ここでは単に流砂量と呼ぶこととする。図-3は上から順に1976～1995年の20年間の石狩大橋地点に

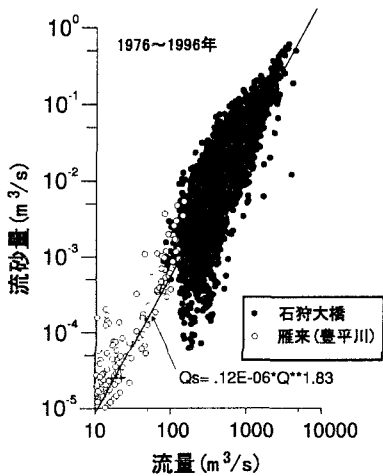


図-4 石狩大橋と雁来における1976～1995年の日流量と流砂量の相関関係

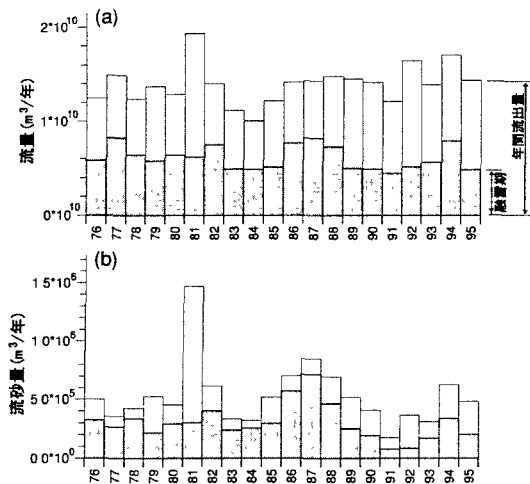


図-5 石狩大橋地点の(a)年間流量と(b)年間流砂量(濁度データからの推定値)

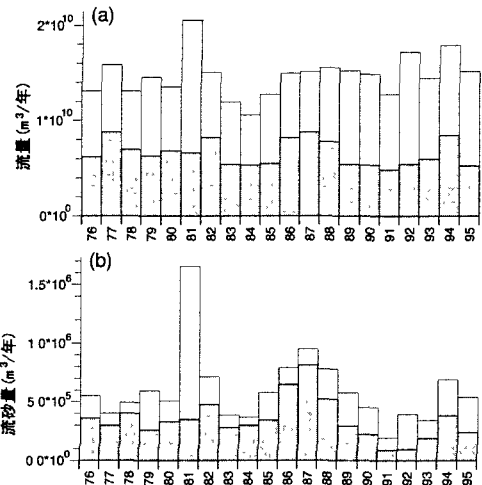


図-6 石狩川河口における(a)年間流量流出量と(b)年間流出流砂量(濁度データからの推定値)

における日流量、日平均濁度から(1)式で勘算された土砂濃度および、これらから計算された流砂量である。さらに、流量と流砂量の関係を調べるために、図-3で示した流量と流砂量の関係を図示したのが図-4である。なお、図-4には、後に石狩川河口からの流砂量を推定する際に必要となる、豊平川の流量と豊平川の採水データより求めた流砂量の関係も合わせて示してある。図-4の流量と流砂量の関係のうち石狩大橋のデータに関して、指数式で最小自乗近似を行なうと次式となる。

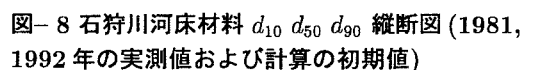
$$Q_s = 1.2 \times 10^{-7} Q^{1.83} \quad (2)$$

ただし、 Q は流量(m^3/s)であり Q_s は流砂量(m^3/s)である。(2)式は全国の河川の浮遊砂観測結果によるwash loadの平均的な値⁴⁾とほぼ一致する結果となっている。また、(2)式は図-4の白丸の豊平川のデータについてもほぼ適合した結果となっている。

図-3は日単位で図示したものであるが、この内流量および流砂量を各年毎に合計して年間の総流量および総流砂量として示したのが図-5で

以上は石狩大橋地点の濁度データから推定した流砂量であるが、本テキストの目的である石狩川河口からの流出土砂量を算定するためには石狩大橋より下流の残流域からの流出分を加算する必要がある。石狩大橋より下流の主要な支川は豊平川のみであり、豊平川の流域面積を石狩大橋の流域面積に加えることにより、石狩川の流域面積の99%をカバーすることとなる。しかしながら、豊平川の連続的な濁度データは石狩大橋に比べごく最近のものしか得られないため、ここでは、豊平川の流量データに関しても(2)式を用いて流砂量を推定し、この結果を図-6に示す。ここで、図-6の上の図は年間流出流量、下の図は年間流出流砂量を示し、いずれも4月と5月の融雪期の分は灰色で示してある。結果的には図-5の石狩大橋地点の年間流量および流砂量とほとんど変わらないが、出水年の1981年では年間流砂量が約160万 m^3 となっている。

図-6 に示した年間流砂量で石狩川からの年間流砂量の特性がほぼ示されたことになるが、ここの流砂量は、流量・濁度・土砂濃度といった関係より推定されたものであり、その成分(粒径)に関する情報が含まれていない。その大部分は微細



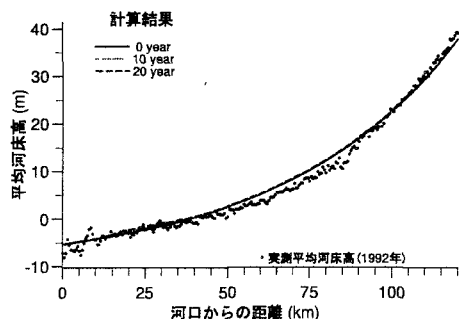


図-9 石狩川の平均河床高計算結果

表-1 計算に用いた土砂の粒径区分 (単位 mm)

番号	粒度範囲	代表粒径
1	~ 0.074	0.054
2	0.074 ~ 0.2	0.137
3	0.2 ~ 0.4	0.3
4	0.4 ~ 1.0	0.7
5	1.0 ~ 2.0	1.5
6	2.0 ~ 4.0	3.0
7	4.0 ~ 10.0	7.0
8	10.0 ~ 20.0	15.0
9	20.0 ~ 40.0	30.0
10	40.0 ~	50.0

粒子の wash load と推定されるが, bed material load としての浮遊砂との関係も曖昧である. そこで, 著者による石狩川の河床変動計算モデル⁵⁾を用いて, 長期の河床変動計算を通して計算される bed material load の流出量を求め, 比較検討を行なうこととする.

モデルの詳細に関する説明は省略するが, その概略は以下のとおりである.

計算区 石狩川の河口から 125km の区間

基礎式 1次元不等流, 粒径別掃流砂・浮遊砂量式, 粒径別濃度連続式, 粒径別流砂連続式および全流砂の連続式

境界条件 上流端で流砂の動的平衡状態 (その場の掃流力から計算される流砂量を与える), 支川からの流入土砂も動的平衡条件, 下流端水位は河口水位の実測値, 下流端の流砂量は自由流出条件

計算は, 図-3(a) に示した 1976 年~1995 年の 20 年間の流量を用いて行なうこととし, 初期河床縦断形状は図-7 に示すように, この 20 年間で

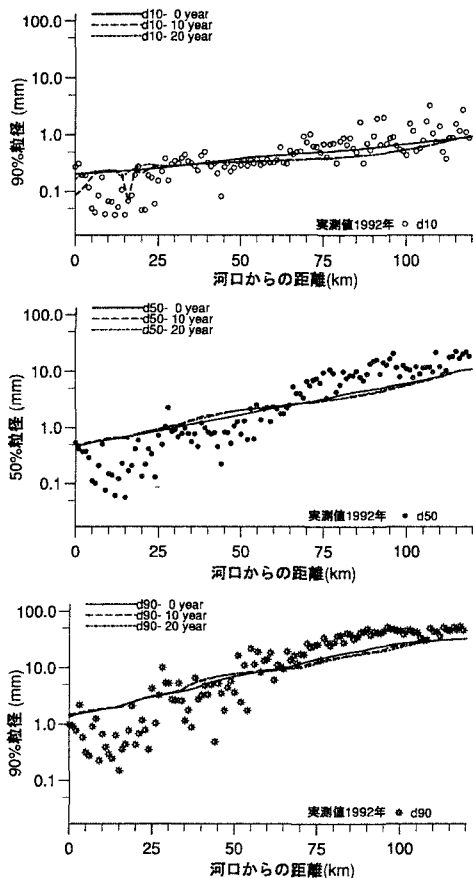


図-10 石狩川河床材料 d_{10} d_{50} d_{90} 計算結果縦断図

特に顕著な変動傾向は見られないため, 実測データ (図中の記号) を基に, 図中の実線で与えた. また河床材料の初期粒径分布は図-8 に示すように, 過去の実測資料より d_{10} , d_{50} および d_{90} を図中の実線で与え, 各地点の粒度分布が対数正規分布に従うとして, 初期粒度分布を与えた. 計算に用いた河床材料は表-1 に示すように 10 の範囲に分割し, それぞれの代表粒径を表に示すように与えた.

ここでの計算は河床材料から流砂量を計算するものであり, 流砂の扱いは bed material load となる. 初期条件として与えた河床材料の粒度分布および河床高を用いて, 図-3 に示した 20 年

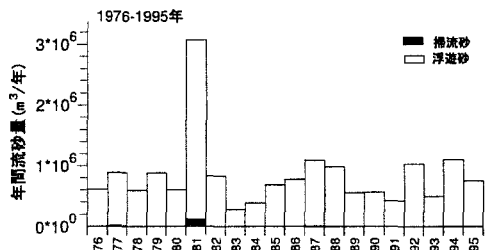


図-11 石狩川河口の年間流砂量の計算結果 (白は浮遊砂, 黒は掃流砂)

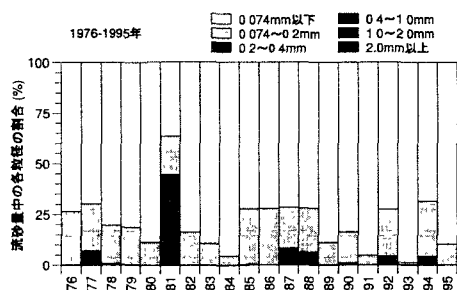


図-12 石狩川河口の浮遊砂の計算結果に占める各粒径の割合

分の日流量を逐次与えて計算を行なった結果の河床高の計算結果を図-9に示す。ここで、図中の黒丸は1981年の実測値に基づく平均河床高である。河床高に関しては特に際立った変化は見られず、現実にも大きな河床変動は見られないことから妥当な結果と考えられる。計算された河床材料の粒度分布より10%, 50%および90%粒径を求め、その縦断分布の経年変化を1992年の実測値と共に示したのが図-9である。粒度分布

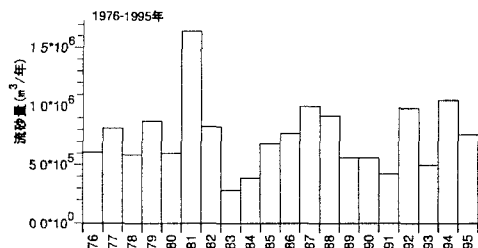


図-13 石狩川河口の年間浮遊砂量の内0.2mm以下の成分の量

の計算結果に関しても、特に大きな変化は見られないが10%粒径に関しては、河口付近で細粒化する傾向が見られる。これは、この期間の計算においては下流部に細粒分が堆積する傾向にあるためと考えられる(図-9のスケールでは判読困難ではあるが、計算結果は河口付近で堆積傾向にある)。

20年分の河床変動計算を通じて河口から流出する流砂量を各年毎に合計して、掃流砂と浮遊砂で分けて図-11に示す。ここで黒色の部分が掃流砂で、白抜きの部分は浮遊砂である。1981年の出水年以外は河口からの流出成分の大部分が浮遊砂として計算されており、その量は、洪水年の1981年で最大年間300万 m^3 程度、平均的な年で60~70万 m^3 となっている。本計算は流砂量を粒径別で扱っているため、流砂量中の各粒径の構成割合を求めることが可能である。図-12は計算の過程において算定される河口からの流出土砂の大部分である浮遊砂中の各粒径の構成割合を年毎に示したものである。これによれば、洪水年の1981年を除いては、浮遊砂の大部分が粒径0.2mm以下の微細粒子であり、1981年でも50%以上が0.2mm以下の粒径となっている。言い換えれば、1981年のような大出水時にはwash loadの量に匹敵するbed material loadの流出があるものと推定される。本計算における流砂の扱いは全てbed material load(もともと河床材料に存在する粒径を用いての計算)ではあるが、流砂量として計算されている粒径を見ると、その殆どがwash loadのような微細な粒径であることが分かる。これらの粒径は計算上ではもともと河床材料中には極僅かな割合でしか含まれていないものとして扱っているが、計算を通して河口から流出しているのは大部分がこれらの微細粒子となっている。ちなみに、図-12で示した流出流砂量のうちで粒径0.2mm以下の成分のみを年間流砂量で示してみると、図-13のようになり、

洪水年の1981年で約160万 m^3 、その他の年では30~80万 m^3 となり前章で示した濁度-流量の関係から求めた年間流砂量[図-6(b)]とほぼ一致する結果が得られる。ここでの計算は1次元モデルの比較的単純なものであり、河床材料の初期分布形や他の条件の与え方も非常に単純なものである。さらに、計算された流砂量(bed material load)の中で、閾値を単純に0.2mmとしてそれ以下の粒径の成分をwash loadと比較することの是非に関しても議論の余地は十分に残されている。しかしながら、bed material loadとして扱っているものの一部がwash loadの推定値と一致するということは、敢えてwash loadとbed material loadという区分を行なわなくてもどちらも、bed material loadの計算方法でも表現できる可能であることを示唆するものであり、極めて興味深い。

2.3 石狩川の土砂移動と変動のまとめ

本章は、河川工学上重要な課題である河川の生産土砂量という課題の中でもっとも基本的な例題としての「はたして石狩川から年間どれくらいの土砂が海に出ているのか?」という疑問に答えるべく、2通りの方法で流出土砂量の算定を行なった。一方は濁度と流量の関係から算定されるwash load的な流砂量であり、他方は河床材料から1次元の河床変動計算を通してbed material loadとして計算される量である。この結果、後者のbed material loadとして計算したものの内の細粒成分が、前者のwash loadとして扱ったものと量的にほぼ一致することが示された。従来、wash loadとは河床材料にほとんど存在しない微細粒径の成分で、河床材料とはコンタクトを持たずに輸送される成分と考えるのが常識であったが、本テキストで示されたように、ごく僅かでも河床材料に含まれていれば、bed material loadとして取り扱っても流砂の大部分を占めるwash loadを表現可能であるのかも知れない。

石狩川のような規模の大河川においては河口から流出する成分の大部分は、粒径から言えばwash loadというべき細粒成分であることに間違いないようであるが、本テキストで示した計算によれば、大規模な出水時にはwash loadの量に匹敵するようなbed material loadも流出しているものと考えられる。

以上の結果を、石狩川の年間生産土砂量という観点で整理すると以下のとおりである。

- 石狩川の通常の年間生産土砂量は50~80万 m^3 である。
- 生産土砂の90%以上は微細粒子のwash loadである。
- 通常の年は年間流出土砂の80%以上が融雪期に生産されている。
- 既往最大洪水の発生した1981年においては300万 m^3 以上の土砂流出があったと推定される。
- 洪水時にはwash load以外の成分も卓越し、1981年の例ではwash loadの量に匹敵する量のbed material loadが流出している。

3. ダムを含む河川における河床変動と土砂収支

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従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^{6),7)}、近年では堆砂の量のみならず質について扱ったもの⁸⁾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⁹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^{10),11),12)}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¹³⁾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。

本テキストで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に関する検討結果を示すものである。本文ではまず、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1,900m³/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るが、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る。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るが、本テキストにおいては特に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。

3.1 対象区間の河道特性量の変化

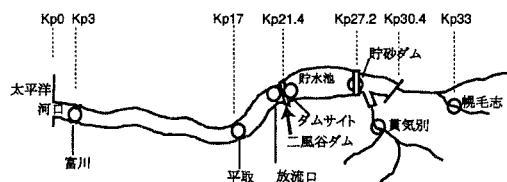


図-14 沙流川の模式図 (○は観測地点)

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-14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-2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。

3.1.1 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面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-3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回に分けて行われた川の仮締め

表-2 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-3 検討対象区間の河道内堆積および洗掘量
単位: (1,000 m³/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

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(m³)、貯砂ダム上流では約245,100(m³)の堆砂が見られる。

3.1.2 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

おける河床高の変化と低水路幅の関係を調べる。

図-15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。

$$Z = 0.0107K_p^2 + 1.318K_p - 1.904 \tag{3}$$

$$dz = H - Z \tag{4}$$

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-16に示す。図-15および図-16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。

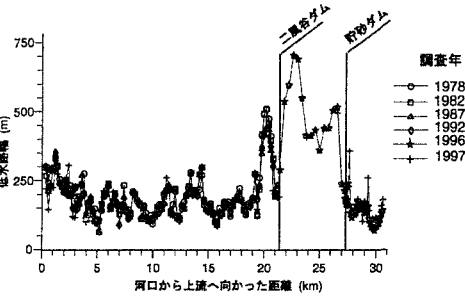


図-15 低水路幅の縦断分布

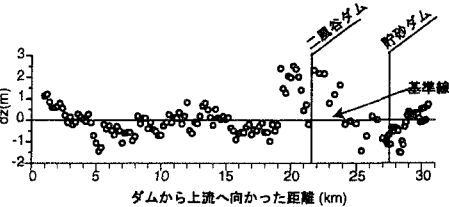


図-16 dzの縦断分布
(ダム下流区間; 1992~1997年変化, ダム上流区間; 1996~1997年変化)

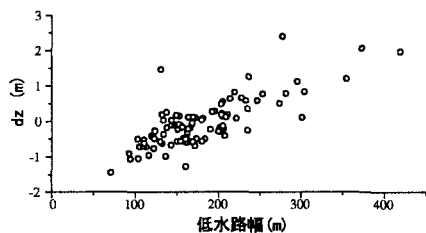


図-17 低水路幅と dz の関係

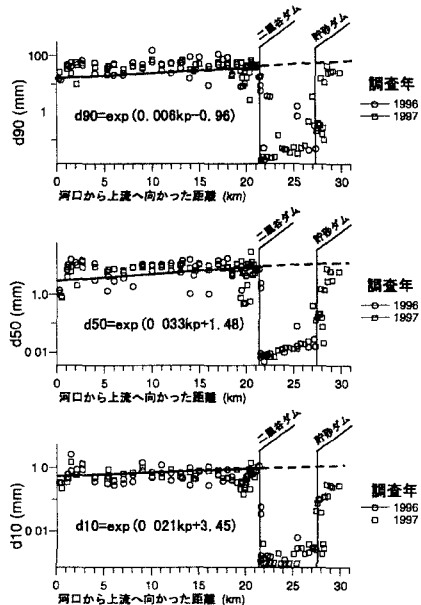


図-18 河床材料 (10%, 50%, 90% 粒径) の縦断方向分布

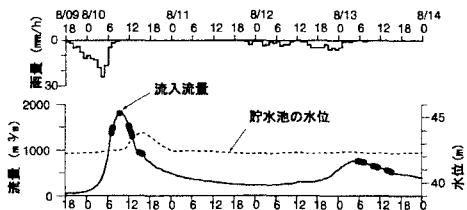


図-19 出水期間中 (1997 年 8 月 9 日 ~13 日) の時間雨量, 流量及びダム貯水位

上記の dz と 1996 年の低水路幅の相関関係を図-17 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。

3.1.3 河床材料

図-18 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。

$$d_{10} = \exp(0.006K_p - 0.96) \quad (5)$$

$$d_{50} = \exp(0.033K_p + 1.48) \quad (6)$$

$$d_{90} = \exp(0.021K_p + 3.45) \quad (7)$$

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ったためと考えられる。またダ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。

3.2 1997 年 8 月の出水時の観測結果¹⁴⁾

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

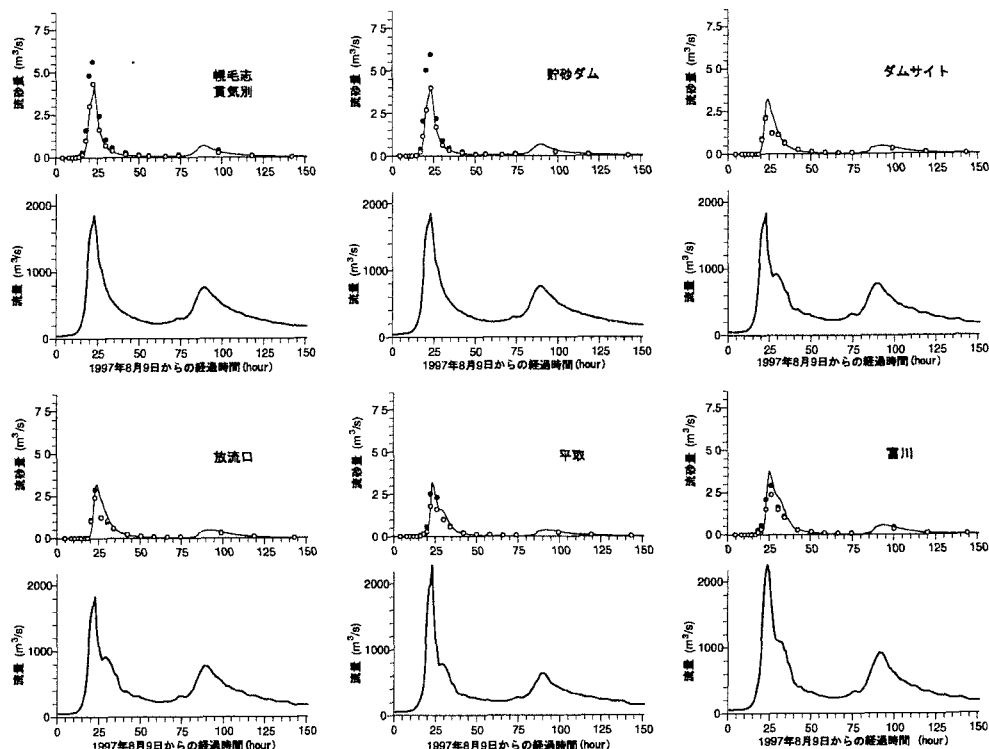


図-20 定点における濁度・SS から算出された流砂量と流量の時間的变化

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1,800m³/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-19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、流入量にほぼ等しい放流が行われた。

3.2.1 定点観測

この出水期間中、図-14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。

$$Q_s = \frac{QS}{w_s 1000^2} \quad (8)$$

ただし、 Q_s は浮遊粒子流砂量(m³/s)、 Q は流量

(m^3/s), S は $\text{SS}(\text{mg}/\ell)$ および濁度, w_s は浮遊粒子の単位体積重量 (g/cm^3), 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 (8) 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-20 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 $\text{SS}(\text{mg}/\ell)$ 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幌毛志および支川の貫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-21 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

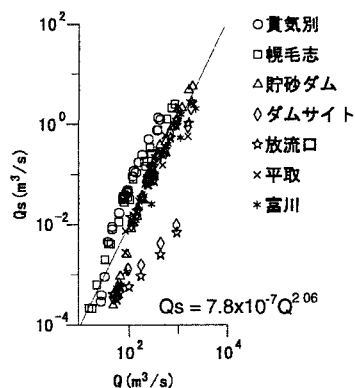


図-21 流量と SS による流砂量の関係 (全観測地点)

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,

$$Q_s = 7.8 \times 10^{-7} Q^{2.06} \quad (9)$$

となり全国河川の Wash Load の推定式¹⁵⁾ の範囲 ($Q = 4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6} Q^2$) に入っている.

図-21 を各観測地点別に分けて示したのが図-22 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のべるが, 粒径 0.074mm 以下の流砂量 (土質工学分類上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

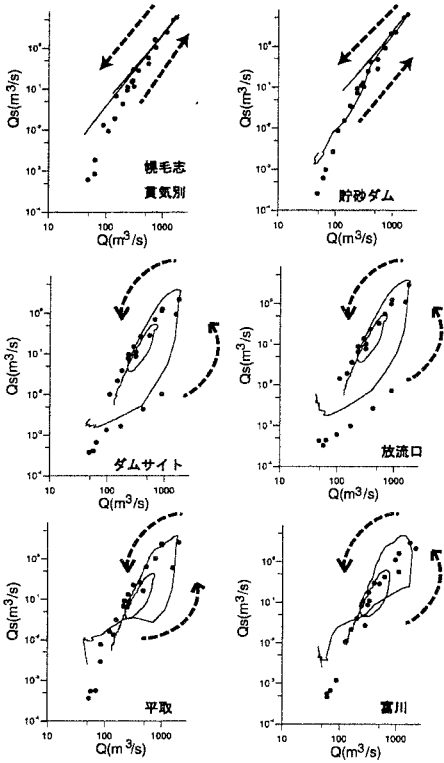


図-22 流量とSSによる浮遊粒子流砂量の関係 (観測地点別) (1997年8月9日12時～15日12時)

る傾向が現れている。これは出水期間中にほぼ流入＝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

表-4 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	横毛志賀気別
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

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-20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-4に示す。この収支によると、貯砂ダムの上流区間で約+26,000(m³)、貯水池内で約+97,000(m³)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。

3.3 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することが出来た。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ヵ月間の計算を行い、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⁵⁾らによる1次元の河床変動計算法を用いる。本研究において流砂

表-5 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
掃流砂		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

を表-5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、計算区間内では最小粒径の浮遊砂として扱うこととする。

3.3.1 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¹⁶⁾、浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式¹⁷⁾、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。

$$\frac{\partial}{\partial t}(< c_i > h) + \frac{1}{B} \frac{\partial(Q < c_i >)}{\partial x} = q_{su} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_x < c_{xi} >}{B} + D_s \frac{\partial^2(< c_i > h)}{\partial x^2} \quad (10)$$

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} 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、 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、

$$c_i = c_{bi} \exp(-\beta \xi) \quad (11)$$

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、 κ 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、

$$< c_i > = \frac{1}{h} \int_0^1 c_i d\xi = \frac{c_{bi}}{\beta} (1 - \exp(-\beta)) \quad (12)$$

により、式 (10) 中の $< c_i >$ 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 $< c_{xi} >$ 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-20 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 $< c_{xi} >$ は本川の濃度 $< c_i >$ に等しいと仮定して与えることとした。

3.3.2 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

$$q_x = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (13)$$

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めることによって与える。

$$h_c = (Q^2 / g B^2)^{1/3} \quad (14)$$

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-6 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	流砂の種類	土の種類
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		礫分
8	4.0~10.0	7.0		礫分
9	10.0~20.0	15.0		礫分
10	20.0~40.0	30.0		礫分
11	40.0~	70.0		礫分

流砂は表-6 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。出水期間中に実測された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。

$$Q_s = 1.39 \times 10^{-6} Q^{2.02} \tag{15}$$

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-18 参照）の近似式 (5)~(7) 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。

3.3.3 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-20 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-22 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-7 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 m³)

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

同様にして 1996 年 4 月から 1997 年 12 月まで

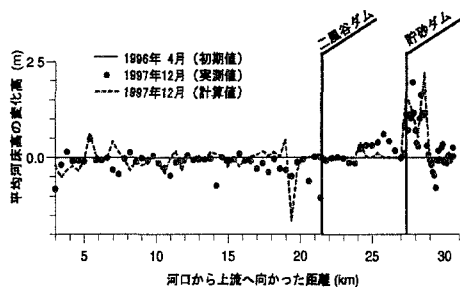


図-23 平均河床高の縦断方向形状の変化
(1996年4月を基準として表示)

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-23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、 $K_p19.6$ 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-24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。実線は式(5)～(7)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、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

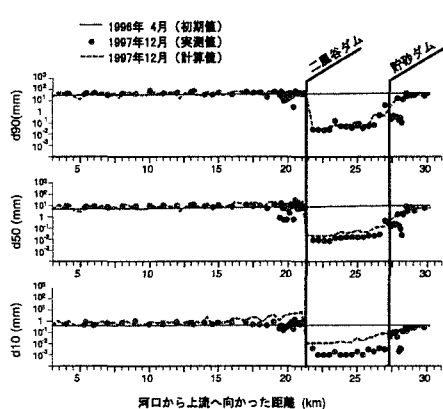


図-24 河床材料の縦断方向分布の変化

である。

1996年4月から1997年12月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-7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-7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、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-24参照)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月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。しか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。

3.4 ダムを含む河川の土砂輸送に関する検討結果

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) 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。

参考文献

- 1) 杉本基泰, 真野明: 阿武隈川における細粒土砂の観測と空間分布, 水工学論文集, 第41巻, pp.783-788, 1997.
- 2) 砂田憲吾, 長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No.385/II-26, pp.37-44, 1994.
- 3) 吉川秀夫編著: 流砂の水理学, 第4章 流砂の算定法, 丸善株式会社, pp.113-149, 1985.
- 4) 建設省河川局: 改訂河川砂防技術基準(案), 調査編, 第12章, pp.303-324, 1978.
- 5) 清水康行: 沖積河川の縦断形と河床材料分布の形成について, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.69-78, 1995.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 河田恵昭, 植本実: 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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, 土木学会論文報告集, No. 600/
II-44, pp.37-50, 1998.

12) 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.

13) Robert H. Webb, John C. Schmidt, G.
Richard Marzolf, Richard A. Valdez, (Edi-
tors): The Controlled Flood in Grand Canyon,
Geophysical Monograph Series, Volume 110,
1999. 368 pages, hardbound, ISBN 0-87590-
0933, AGU code GM1100933. AGU.

14) 坊野聡子, 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.

15) 土木学会: 水理公式集, pp.230, 1980.

16) 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.

17) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel
flow with suspended sediments, Proc. of ASCE,
HY8, pp.1325-1343, 1980.