

論文

貯水池堆積土砂の掘削管理とその下流河川還元に関する研究

岡野 眞久¹ 菊井 幹男² 石田 裕哉³ 角 哲也⁴

Study on Reservoir Sediment Excavation Management and Sediment Replenishment to Downstream Rivers

Masahisa OKANO Mikio KIKUI Hiroya ISHIDA Tetsuya SUMI

ダム貯水池堆砂の進行に伴い生ずる貯水池上流部河床の上昇などへの対応, さらには下流河川・海岸の環境保全などの面から総合的な流砂の管理が必要になっている。その手段の一つとしてダム貯水池に流入・堆積した土砂の一部を掘削後, ダム下流河道へ運搬・仮置し, 再び洪水とともに河川を通じ海まで流下させる手法が試みられており, その手法の確立が急がれている。本論文では, 天竜川佐久間ダム貯水池の堆砂を掘削し, 佐久間ダム下流の秋葉ダムおよび船明ダム下流河川に還元することを想定し, これらによる河床変化等について論ずるものである。

キーワード: 貯水池堆砂対策, 河床変動シミュレーション, 下流河川還元, モニタリング, 合意形成

1. はじめに

わが国では貯水池堆砂対策としては粗粒土砂の掘削・浚渫による搬出とその有効利用が, 取水口周辺や貯水池上流河床上昇などに対する緊急避難的・局所的な対策として行われてきた。岡野ら¹⁾ は, 流す堆砂対策の理念のもとにこの方法を「貯水池に捕捉された土砂を陸上掘削 (もしくは浚渫) した後, ダム下流河道に運搬仮置きし, 自然の洪水とともに下流河川に還元する方法」として, 貯水池堆砂対策の柱の一つに位置づけた。

この「河川還元」方式には, 排砂時の貯水位低下や土砂処分が不要であり, ダム下流域の環境状況に応じて還元土砂量や粒径, 仮置場所を選択できる。また, 大規模な設備が不要で堆砂の進行に応じた対応が可能である。

ここでは堆砂の進行が懸念されている図-1に示す天竜川の河口から約71 kmの本川に設置された発電ダ

ムである佐久間ダム (電源開発 (株), 1956年竣工) 貯水池と, その約23 km下流に位置し, その逆調整機能をもつ秋葉ダム (電源開発 (株), 1958年竣工) 下流河川を事例に, 貯水池堆積土砂の掘削とその下流河川還元に関し考察する。

ダムからの土砂の適切な供給は下流河川・海岸の土砂環境ひいては生物生息環境の保全および回復の観点からも重要な意味があることが近年指摘されている。本方策は関係者の合意が比較的得られやすい堆砂対策の一つであり, いくつかの管理中のダムで既に取り組まれている。

2. 佐久間ダム貯水池の堆砂とその掘削管理

2.1 堆砂の進行と堆砂対策

佐久間ダム貯水池内上流部の堆砂により洪水水位が上昇し, 1970年頃には, 設計洪水量 (7,700 m³/s) に近い大規模な洪水が発生した場合には第三者の土地が冠

¹ 財団法人ダム水源地環境整備センター 理事, 工修

² 国土交通省 中部地方整備局企画部防災課 (前 浜松河川国道事務所)

³ 株式会社建設技術研究所 東京本社ダム室, 工修

⁴ 京都大学 大学院工学研究科, 博 (工)



図-1 流域の概要

水する恐れが出てきた。このため洪水により冠水の恐れがある区域の用地を買取るなどの暫定措置をとりながら堆砂対策の検討が始められた²⁾。ちょうどこの頃(1971年)から砂利採取による湖外搬出が始められた。

その後、1982年の水利権更新に際し、湖内掃砂他による計画維持河床(1970年の河床)の復元・維持を基本方針とすることになり、それまで続けられてきた湖外搬出に加え、湖内移送は1990年から、湖内掃砂は1991年から行われるようになった³⁾。

a) 湖外搬出

1995年からは年間40万 m^3 を目途に、コンクリート骨材・客土材として地元砂利採取業者により湖外搬出されている。これは2隻の浚渫船で主として粗砂をサンドポンプにより船倉に積み込み、水切りして、ダム地点上流約5km右岸地点に設けられた揚砂場まで運航・陸揚げし、それをトラック輸送によって搬出、販売している。1994年からは、貯水池末端部で陸上掘削され同じくトラック輸送によって搬出、販売される

ものが加わっている。

b) 湖内移送

ダム管理者が行う計画維持河床より上に堆積した土砂を標高220m以下の死水域へ移送することを湖内移送と呼んでいる。ダム上流約12~23kmにおいて、2隻の浚渫船により吸引された土砂は浚渫船自体の船倉(800 m^3)に積み込まれ水切りされる。浚渫船は2隻の押船に捨て土地点まで曳航された後、船底に設けられたバルブが開かれ土砂は投下される。1990年から一部が開始され、1991年から2船団で年間40万 m^3 を目途に実施されている。

c) 湖内掃砂

近年では「流砂促進」と呼ばれ、非洪水期に貯水位を低下させて湖内上流部を河道状態とし、流水掃流力を増加させることにより堆積土砂を貯水池下流部の死水域へ侵食移動させるものである。具体的には、2月中旬から3月下旬の35日程度、貯水位を通常よりも25~30m低下させて発電利用水深40mを15~10m(EL.235~230m)に制限する。これにより年間100万~200万 m^3 程度の土砂が移動していることが堆砂測量結果から確認されている。

2.2 近年の堆砂傾向と必要な対策

a) 堆砂形状の変化と堆砂量

図-2に1956年の佐久間ダム建設以降2000年までの貯水池縦断堆砂形状の変化を示す。1956年以降現在に至るまで流入土砂の大部分が貯水池に堆積し続けており、設置後45年を経た2001年には約3.2億 m^3 余の総貯水容量に対して総堆砂量は1.13億 m^3 余となり、堆砂率は約35%に達した。これは単純平均で約250万 m^3 /年の堆砂量になる。近年の実績は当初より減少し、1991~2000年の平均堆砂量は湖外搬出量を戻して約130万 m^3 /年となっている。

b) 堆砂の粒度構成

佐久間ダムでは管理者である電源開発(株)により1979~2000年にかけて、湖底表層試料採取による性状調査および堆砂の活用を目的にした湖底から約5~20mの深さまでのボーリングによる堆砂性状調査⁴⁾が行われた。粒度分析調査も同時に行われている。

図-3には佐久間ダムの貯水池内で実施されたボーリング調査結果を用い、貯水池中、上流部の堆積土砂

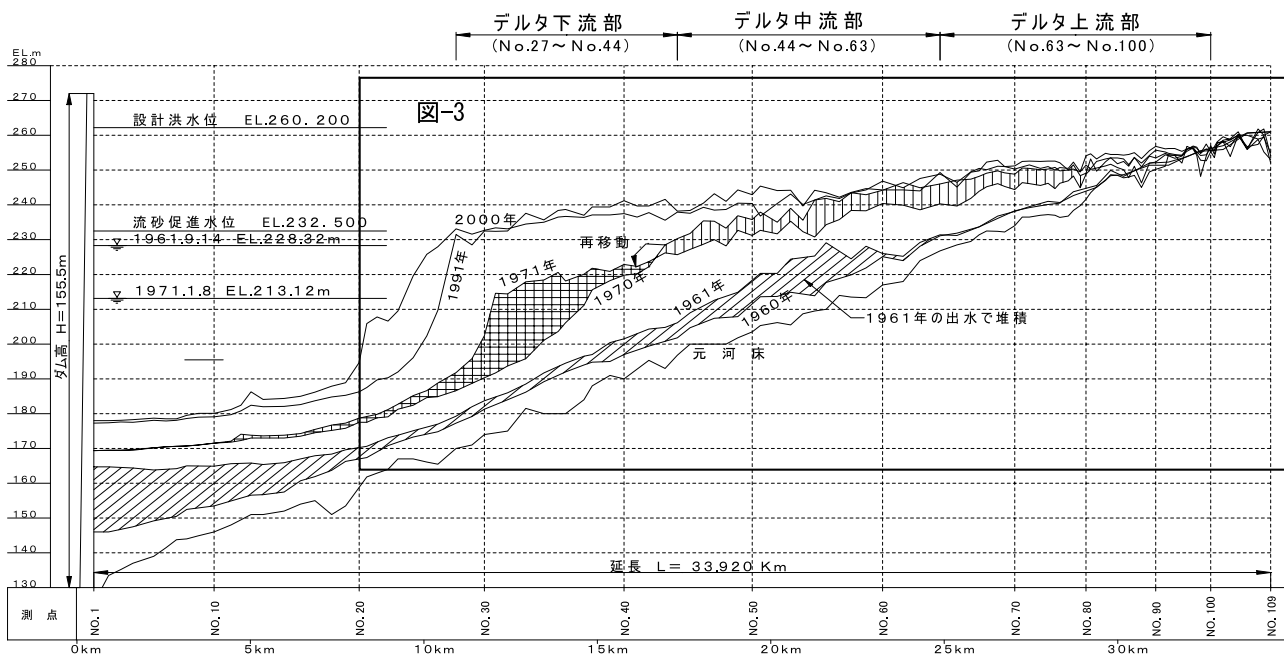


図-2 堆砂進行経年変化図

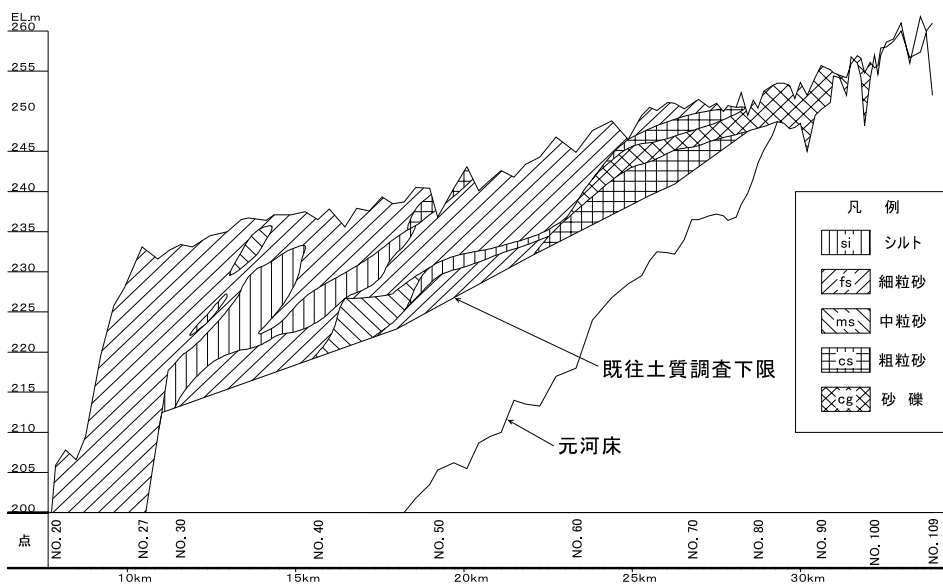


図-3 土層区分図 (頂部堆積層部)

の土層区分を示した。これより、デルタ上流部では砂礫、粗砂が多く、下流になるに従い細砂が卓越し、堆砂肩の先端ではシルトの割合が多くなっていることがわかる。土層区分ごとの平均粒度分布を図-4に示す。さらに、これらの調査結果をもとに推測可能な範囲における堆砂全体の粒度構成が推定されており³⁾、これを図-4に示す。これは概ね1960年代後半以降の堆砂部分に該当する。

c) 頂部堆積層の堆砂の動向と追加対策

図-5は頂部堆積層を下流部 (No. 27~44 : 6.7 km)、中流部 (No. 44~63 : 7.7 km)、上流部 (No. 63~100 : 7.3 km) に区分し、それぞれデルタ下流部、デルタ中流部、デルタ上流部と名付け、1967年以降のデルタ各部の元河床からの変動量を区間ごとに平均した値により示したものである。1967年以降で記述したのは、1967年にそれ以前の測量ピッチが変更されたためである。全般に堆砂の進行は鈍化しているが、これよりデルタ各部

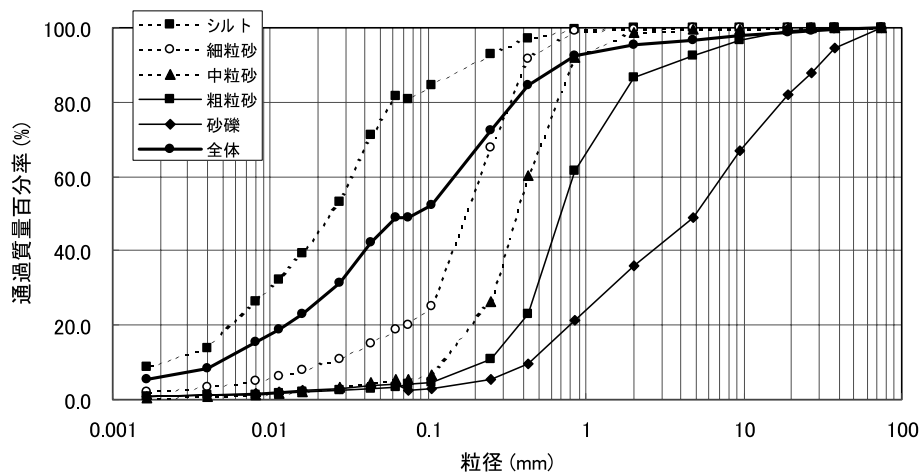


図-4 土層区分ごとの平均粒径分布図

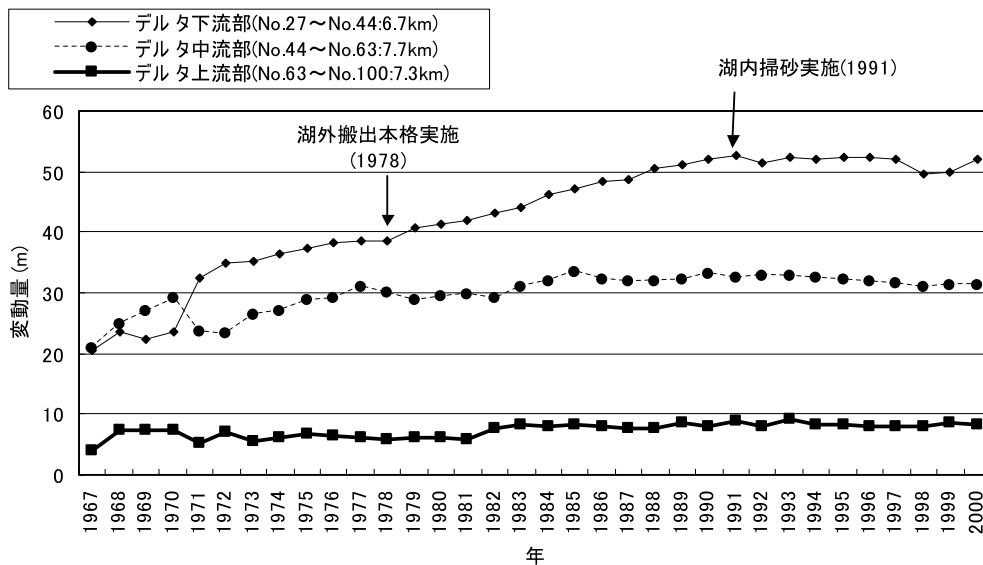


図-5 堆砂デルタ各部の河床高経年変化図

の変動状況の違いが読み取れる。

デルタ中流部では、湖外搬出が本格化した1978年以降は堆砂の進行は鈍化した。また、デルタ下流部でも流砂促進が実施され始めた1991年以降は堆砂の進行が止まっているように見える。

しかし、デルタ上流部では、これら湖外搬出、湖内移送および流砂促進が行われているにもかかわらず、河床が低下するには至っていない。このことより、デルタ上流部にはこれらの排砂対策の効果が十分及んでおらず、言い換えれば、デルタ上流部に堆積する礫・粗砂主体の土砂は貯水位の低下やデルタ中・下流部での浚渫や流砂促進によっても移動させることはなかなか困難であることがわかる。新庄ら⁶⁾も、このデルタ上流部での流水掃砂による粗粒化の進行を指摘してお

り、当面の堆砂対策として機械力による掘削・搬出を追加することが現実的と考えられる。

2.3 堆砂デルタ掘削による河床変動のシミュレーション

これまで行われてきた堆砂対策に追加して、貯水池デルタ上流部に堆積する粗粒土砂を毎年、掘削・搬出してデルタ上流部の河床上昇を回避する方策を検討するため、表-1に示す条件のもとに1980~1996年の17年間を計算対象期間とする貯水池内の一次元河床変動計算を実施した。なお、掃流力が急減する貯水池内では、浮遊砂の非平衡性が問題となるが、本研究はデルタ部での土砂移動を主に議論するため、従来から行われている河道部の河床変動計算（平衡状態の浮遊砂量式）を用いた。

表-1 佐久間ダム貯水池堆砂モデルと秋葉ダム下流河床変動計算における検討条件

項目	佐久間ダム貯水池領域	下流河川～海岸
計算対象区間	佐久間ダム堤体 (No. 0) ~ 佐久間ダム貯水池末端 (No. 109: 堤体から 33.9 km)	河口から 10 km 沖合い～佐久間ダム (河口から 10 km 沖合いまでの断面: 河床高は深淺測量, 川幅は河川水が拡散すると考えられる角度 (22°) で設定)
計算対象期間とその流況	計算期間: 1980年1月1日～1996年12月31日 (17年間) 使用流量: 佐久間ダム実績流入量, 平常時は計算から除外 洪水時 ($q \geq 0.8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$): 毎時流量 流水掃砂時 (貯水位 $\leq 245.0 \text{ m}$): 日平均流量	計算期間: 1979年1月1日～1999年12月31日 (21年間) 使用流量: 鹿島地点において, $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の毎時流量, 平常時は計算から除外
流れ	1 次元不等流モデル (レベル 1) ⁷⁾	
	下流端水位: 佐久間ダム実績貯水位 洪水時 ($q \geq 0.8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$): 毎時 流水掃砂時 (貯水位 $\leq 245.0 \text{ m}$): 日末貯水位 粗度係数: $n=0.035$ (背水計算の検証値)	下流端水位: T.P. 0.063 m (御前崎検潮所の平均水位) 粗度係数: $n=0.031 \sim 0.036$ (実の河床 (低水路と高水敷の合成値) 計算結果による)
河床変動	モデル: 粒径別連続式 ⁸⁾ に基づく 1 次元河床変動モデル 流砂量式: 掃流砂量式: 芦田・道上式 ⁹⁾ 浮遊砂量式: 芦田・道上が導いた平衡流砂量式 ¹⁰⁾	
	初期河床: 1979年の測量結果 河床材料: S54～H11の河床材料調査結果より設定 河床変動幅: 有効断面幅 (流量・流砂) はレジーム則使用 (貯水池区間が卓越し, 死水域が多くなる)	初期河床: 1979年の測量結果 (秋葉ダムあり) 河床材料: S41の河床材料調査結果より設定 河床変動幅: 有効断面幅 (流量・流砂) は河道断面より設定 (船明ダムより上流は貯水池区間が多いため, レジーム則使用)
土砂流入	土砂量: 貯水池上流端から洪水時におけるのみ土砂は流入する 1980年～1996年の17年間における“実績堆砂量+砂利採取量”を用い, 流入堆砂相当量は流量に比例するとして洪水流量～流入堆砂相当量 関係式を設定. $L=0.004076 \times q$ L : 流入比堆砂相当量 [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$] q : 比流量 [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$] 粒径分布: 佐久間ダムのボーリングデータ結果から得られた堆積土砂の粒度分布 (図-4). (粒径区分は, ウォッシュロードを含む全粒径を 8 分割)	土砂量: 堆砂相当量から設定 上流端: 佐久間ダムからの流出土砂量はゼロとする. 支川: 右支川系は新豊根ダム実績堆砂量の推定式, 左支川系は小渋ダム実績堆砂量推定式を補正. 右支川系: $L=0.001984 \times q^{1.001}$ 左支川系: $L=0.007337 \times q^{1.000}$ L : 流入比堆砂相当量 [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$] q : 比流量 [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$] 粒径分布: 佐久間ダム貯水池領域と同様に設定. (粒径区分は, 0.075 mm 以下の粒径は除外し 14 分割)
	湖外搬出, 湖内移送等: 計算各年の最終日に採取設定区間より設定した量を一様に採取	砂利採取: 計算各年の最終日に採取設定区間より, 設定した量を一様に採取 土砂還元: 佐久間ダム貯水池領域デルタ上流部上流区間で採取した粒径 (シミュレーション結果) の土砂を秋葉ダム直下および船明ダム直下に置土 (各ダム直下に仮想支川を設定し, そこから土砂が流入)
モデルの同定	初期河床を 1979 年とし, 実績流量 1980～1996 年の 17 年間の計算値と, 1996 年の実績堆砂形状および累加堆砂量, 河床変動量の経年変化, デルタ上流部 (区間 63～100) での粒径分布の経年変化から検証.	初期河床を 1978 年とし, 実績流量による 1979～1999 年の 21 年間の計算値と実績河床変動量の経年変化, 1999 年の実績粒径分布との比較により検証.

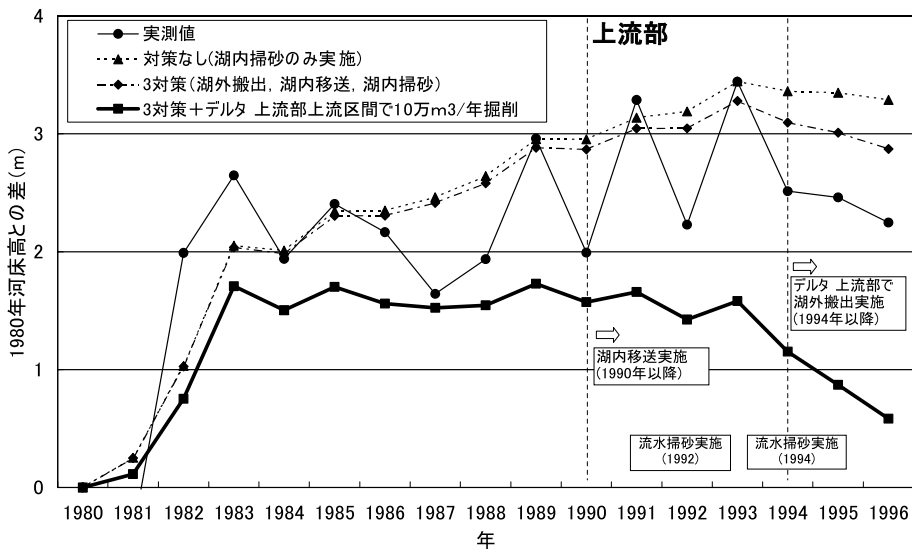


図-6 佐久間ダム貯水池デルタ上流部 (No. 63～100) 河床変動量経年変化

デルタ上流部 (図-5 と同じ設定) における 1980 年の河床を初期河床とした河床変動量の経年変化に関する計算結果を図-6 に示す。

まず, 佐久間ダムで実際に湖外搬出した量 (No. 35～57 で 17 カ年, 年平均約 23 万 m^3 , および No. 58～100 で 1994 年から 3 カ年, 年平均約 3 万 m^3) と湖内移送

分(No. 30~60で1990年から7カ年, 年平均約40万 m^3)を考慮に入れた計算結果(◆)と実績の変動量(●)とを比較すると, 概ね実績値の再現はできているものと考えられる。

次に, これまで行われてきた湖外搬出および湖内移送の2対策の効果を, 実施した場合(◆)と実施しなかった場合(▲)の河床高の推算値で比較すれば, 実施しなかった場合が約0.5m高くなり, この差がこれら2対策の効果と考えられる。1982年と1983年に河床が他の年と比べ大きな変動量を示しているが, これはこの両年に大規模出水があったためである。また, 1989~1994年にかけて実測値が大きく変動しているが, これは湖内掃砂が一因と考えられる。17年間のシミュレーションからデルタ上流部の河床上昇を抑えるにはさらに追加的な対策が必要であることがわかる。

ここでは示していないが, デルタ上流部, 中流部, 下流部でそれぞれ10万 m^3 /年を追加掘削したケースと比較すると, デルタ上流部の掘削がデルタ上流部河床の上昇を抑制する効果が大きい。さらにデルタ上流部を上流区間(No. 87~100), 中流区間(No. 77~86), 下流区間(No. 63~76)に細区分し, デルタ上流部の河床変動に与える影響度や施工性を比較考慮すると, デルタ上流部上流区間での掘削がより有効であると判断し, 以降の検討を進めた。

図-6にはデルタ上流部上流区間で10万 m^3 /年を追加掘削する場合のデルタ上流部全体の変動状況を示し

た。これらより, デルタ上流部上流区間で毎年10万 m^3 程度を追加掘削すれば17年サイクルで上流部の河床を維持することが可能になると考えられる。なお, 図-6に示す対策なしと3対策との変動量と, 3対策と3対策+10万 m^3 /年掘削との変動量を比べると, デルタ上流部上流区間で10万 m^3 /年掘削の方が大きな値となっている。これは, 3対策のうち, 湖外搬出および湖内移送はともにデルタ中流部で主に実施されているのに対し, デルタ上流部上流区間での10万 m^3 /年の追加掘削は, デルタ上流部での本格的な掘削に相当し, 効果が高いためと考えられる。

図-7に, 同じ河床変動モデルで推算した佐久間ダム貯水池デルタ上流部上流区間(No. 87~100: 約2.2km)に堆積している土砂の代表粒径(d_{60})の経年変化を示す。これより, 定性的には洪水による流入土砂は細粒化に作用し, 湖内掃砂は粗粒化に働くことはある程度は説明できる。しかし, それらの量的な因果関係をこのモデルにより正確に推定するには限界があるものと考えられる。

3. 秋葉ダム下流河床の変動実態と土砂還元による河床変動

3.1 天竜川下流河川の河床変動の実態

a) 天竜川下流部河道

天竜川下流部0~25km(河口から鹿島まで)区間の1962年(秋葉ダム竣工1958年)から2000年の28年

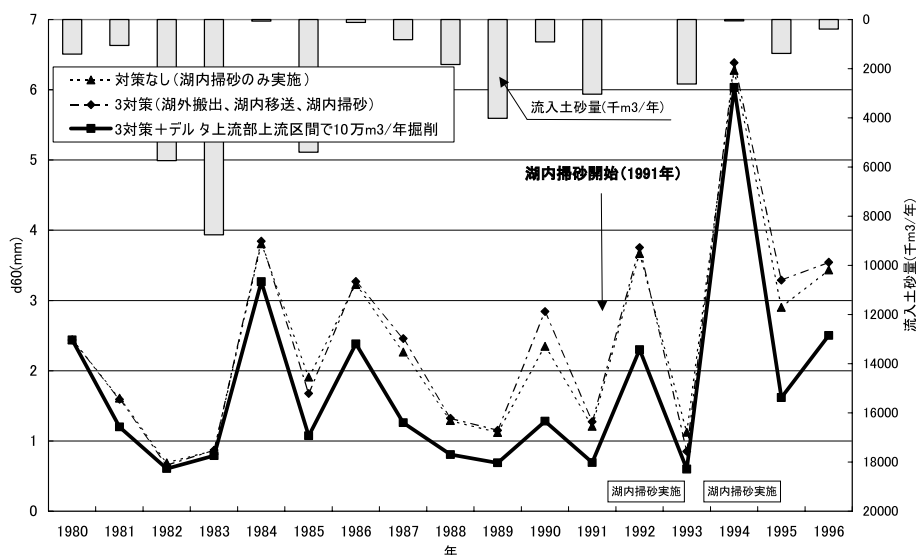


図-7 佐久間ダム貯水池デルタ上流部上流区間(No. 87~100)代表粒径(d_{60})経年変化

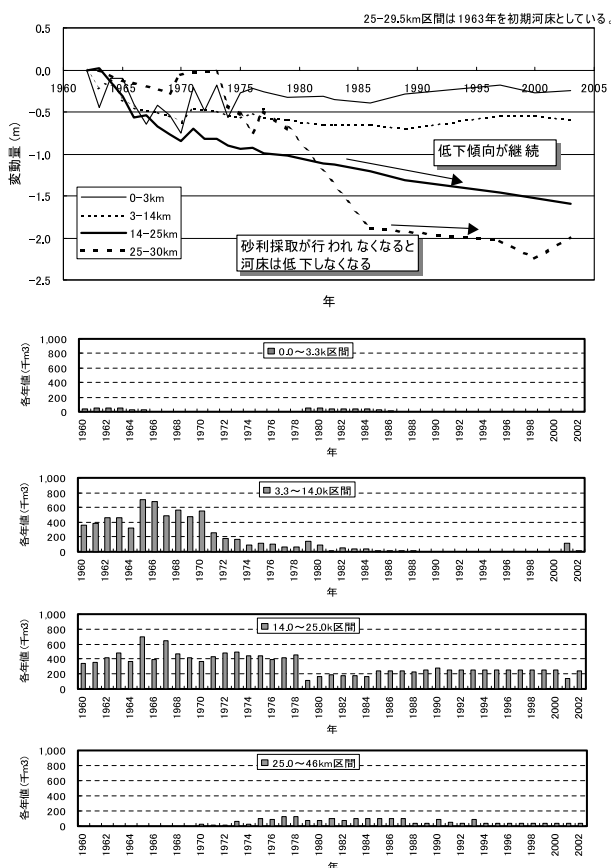


図-8 天竜川下流部の各区間の平均河床変動量の経年変化と砂利採取量

間における平均河床の河床変動量と砂利採取実績を図-8に示す。これより、3～14 kmおよび25～30 kmの区間の河床の変動は、河道から採取された砂利の量の変化と関連が強い。一方、14～25 kmの区間は近年に至っても砂利採取の継続等によりその低下傾向は止まっていない。今後ともそれらの動向には注意をしていく必要がある。

また、岡野ら⁵⁾は佐久間ダム貯水池堆砂、河道部および海岸部の土砂の粒度分布を図-9のように比較した。これより天竜川下流部の土砂動態の特性を、① 粒径0.1 mm以下の土砂は河道および海岸にはほとんど存在しない、② 粒径0.1～1.0 mmの土砂が海岸砂浜を形成するが、河道にはほとんど堆積していない、③ 粒径0.1～200 mmの土砂が河道に堆積して河床を形成するが、0.2 mm以下の土砂は10%以下を占めるにすぎないとし、④ 佐久間ダムに堆積する粒径0.1 mm以下の土砂(約50%を占める)をダムから放流または通過させても河道で堆積することなくほとんどの量は沖合

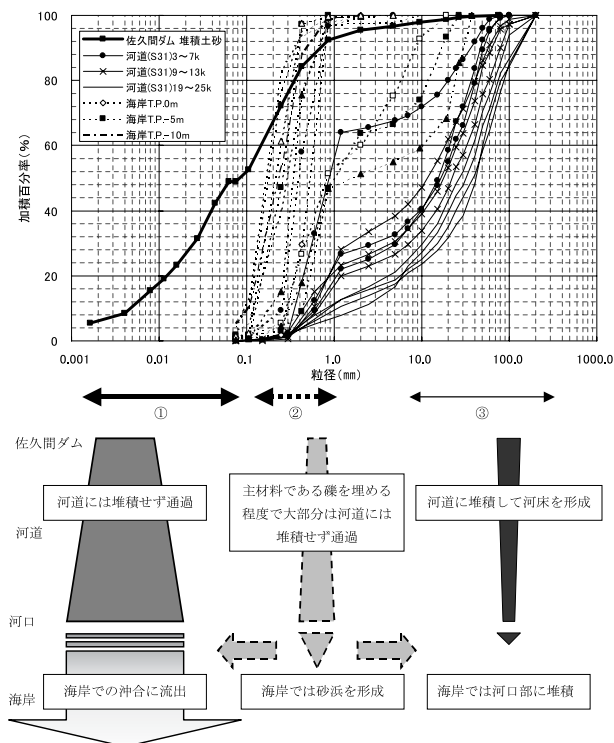


図-9 佐久間ダム堆砂土砂、河道、海岸における土砂の粒度分布と粒径集団特性の模式図

に流出する、⑤ 粒径0.1 mm以上の土砂をダムから放流する場合には河道部での堆積状況をチェックする必要がある、と概略的な分析をしている。

b) 秋葉ダム下流部と船明ダム貯水域

ダム直下流の河川の状況はダム設置により変化していると考えられるが、山間部であるのでその実態は必ずしも明らかにはなっていない。秋葉ダムの下流部と船明ダム貯水域でもダム建設前からの河床高観測記録はなく、設置後約5年を経た1963年以降のデータが存在するだけである。1963年までの変化は不明であるが、1963年から2003年までの同区間(河口から30～47 km)の最深河床高の経年変化を図-10に示す。

1963年から2003年までの間、秋葉ダム直下流約5 km区間(河口から42～47 km)は3～5 mの激しい最深河床の低下が読み取れる。これよりさらに下流約6 kmの区間(36～42 km)では上流にダムのない支川気田川が合流し、また、砂利採取も行われているが、最深河床の大きな低下が認められる。これに対し、船明ダム貯水域上流部約3 km(33～36 km)では最深河床は上昇しており、貯水域下流部約3 kmの区間(30～33 km)は大きな変化はなく、船明ダム下流の河床下部

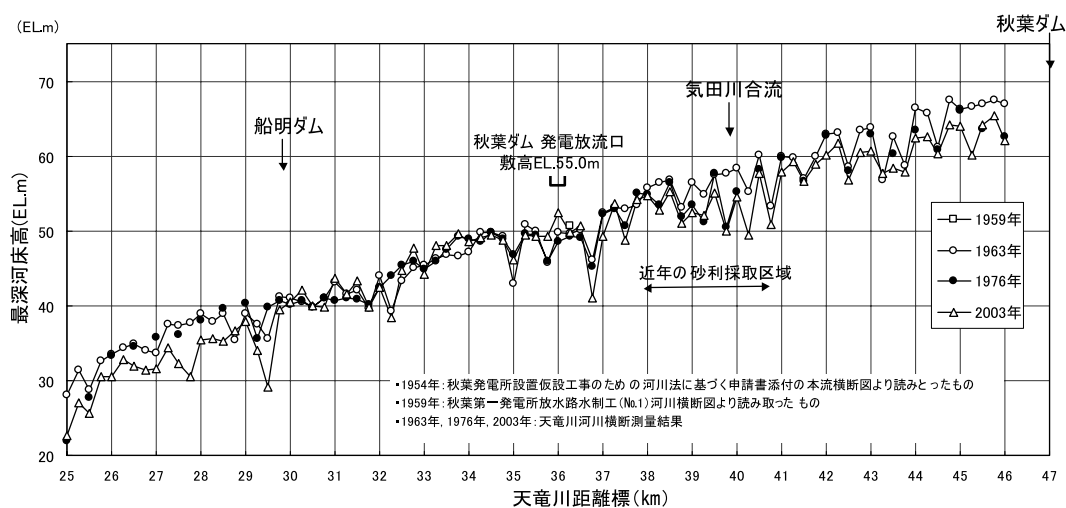


図-10 天竜川船明ダム～秋葉ダム河道最深河床縦断面図

分に続く。船明ダムから鹿島間約 5 km の区間 (25～30 km) においても、3～8 m 程度の最深河床の低下が読み取れる。

一方、秋葉ダム直下流から支川気田川合流点まで約 7 km 区間 (40～47 km) における河床表層と下層 (表面マイナス 1 m) の 60% 粒径の縦断変化を図-11 に示す。

これより地点 2 の表層の 60% 粒径が他の地点に比べ大きな値を示し、秋葉ダムから下流に行くほどその値は小さくなる傾向が認められる。

また、地点 9 は大規模貯水池を有さず、かつ土砂生産が活発な支川気田川合流点よりも下流であり、60% 粒径は表層と下層とで相対的に近い値を示す。表層と下層では粒度分布調査方法が異なるため一概にはいえないが、これらから、秋葉ダム設置に起因すると思われる河床材料の粗粒化が考えられる。

3.2 土砂還元による下流河床変動のシミュレーション

a) シミュレーションの条件等

図-9 より、天竜川下流の場合、粒径 0.2 mm 以下の細粒土砂を供給すれば河道に堆積することなく海まで流下すると考えられるが、粒径 0.8 mm 以上の土砂を供給した場合、上流から河床を高めながら流下すると考えられる。これらを確認するため表-1 に示す条件による次元河床変動計算を行った。仮置き土砂には佐久間ダム堆積土砂を用いることを想定し、佐久間ダムデルタ上流部上流区間 (No. 87～100) の粒度構成

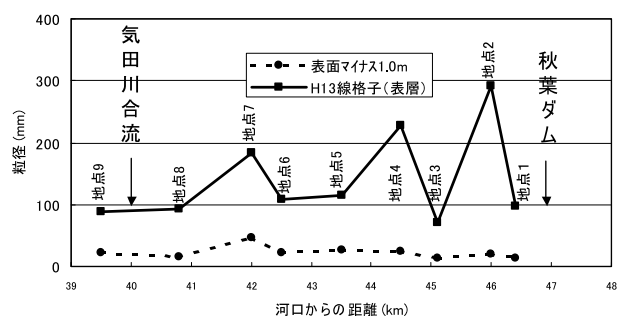


図-11 木田川合流点～秋葉ダムの代表粒径 (60% 粒径) の縦断変化

(粗砂、砂礫、図-4 参照) を与えることとした。仮置き土砂量は秋葉ダム直下流に毎年 3 万 m^3 、船明ダム直下流に 7 万 m^3 とし、63 年間続ける。砂利採取は現状のまま継続するケースと全く採取しないケースを想定した。

b) シミュレーション結果

図-12 は、表-1 に示す条件で次元河床変動計算を実施した結果と実績値とを比較したものである。秋葉ダムから河口までを 1959～1999 年の間の変動を表現しつつ、1979～1999 年の変動をとり出しているため船明ダム～鹿島間は実績の傾向と一致させ得ないが、それ以外の区間では実績の傾向と計算結果は概ね一致している。なお、船明ダム～鹿島区間は、船明ダムおよび鹿島地点で河道が狭くなりその間の河道は広い形状を示している。今回の次元河床変動計算では表現しきれない、砂利採取などの影響や河床低下の要因があるものと考えられる。

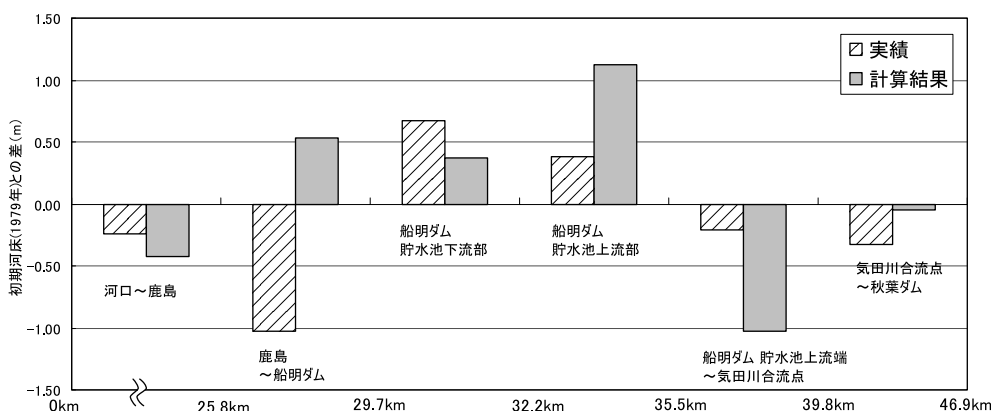


図-12 秋葉ダム下流各区間の河床変動量（1979年～1999年）（実績値と計算値の比較）

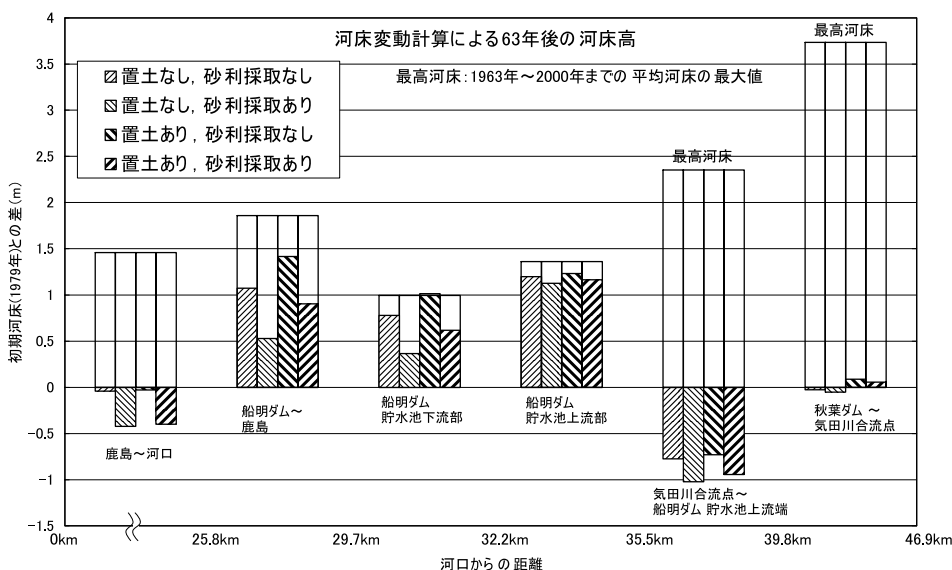


図-13 秋葉ダム下流各区間の河床変動量の堆算（最高河床との比較）

図-13は、初期河床と土砂還元（毎年秋葉ダム直下流3万 m^3 、船明ダム直下流7万 m^3 ）を63年間続けて平衡状態になった後の河床高との差を区間平均で示したものである。なお、図-14に「置土あり、砂利採取あり」のケースの河床変動の過程を示した。この両図では、区間ごとの河床変動特性を把握するため、下流河道を秋葉ダム～気田川合流点（約7km）、気田川合流点～船明ダム貯水上流端（約4km）、船明ダム貯水域上流部（約3.5km）、船明ダム貯水域下流部（約2.5km）、船明ダム～鹿島（約5km）、鹿島～河口（約25km）の6区分で示している。

これらより秋葉ダム～気田川合流点の区間は、土砂還元すると河床は上昇するが、砂利採取の有無にかかわらず1963年以降の最高河床を大きく下回る範囲に留まる。一方、船明ダム貯水池上流部は貯水の影響

か、63年の計算期間中は一貫して河床は上昇することになる。したがって、秋葉ダム直下に土砂還元を行った場合、この区間の河床高の管理が土砂還元の際の制約条件になると考えられる。

船明ダム貯水池下流部は洪水時のゲート引き上げにより河道状態になるため、河床上昇の程度は小さい。船明ダム～鹿島も河床上昇区間であり、土砂還元による上昇量も大きい。これら3区間はいずれも現状の砂利採取が続けば土砂還元をしても河床高は1963年以降の最高河床高を上回ることはいない。

鹿島～河口区間は、このまま砂利採取が続けられれば河床は大きく低下する。この規模の土砂還元では、わずかに河床低下量を減ずるのみである。

図-15、図-16は、土砂還元による河床の粒度分布の変化を示したものである。ここに示す初期値は、1966

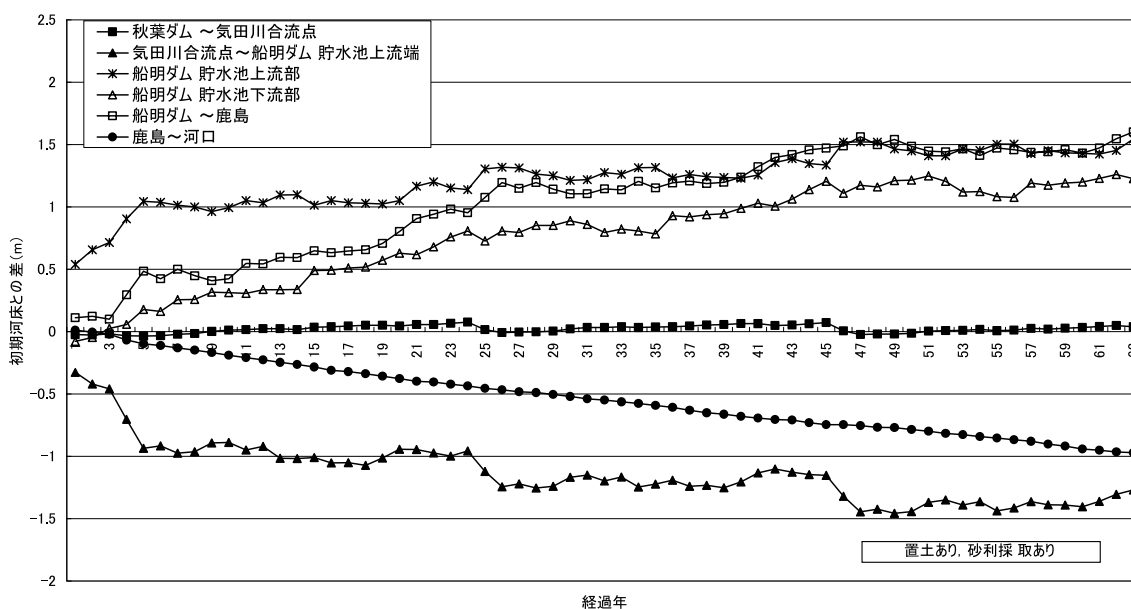


図-14 天竜川秋葉ダム下流各区間の河床変動量経年変化

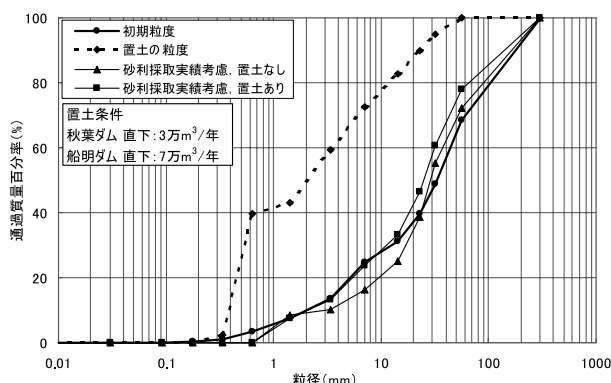


図-15 河床材料粒度分布 (秋葉ダム～気田川合流点)

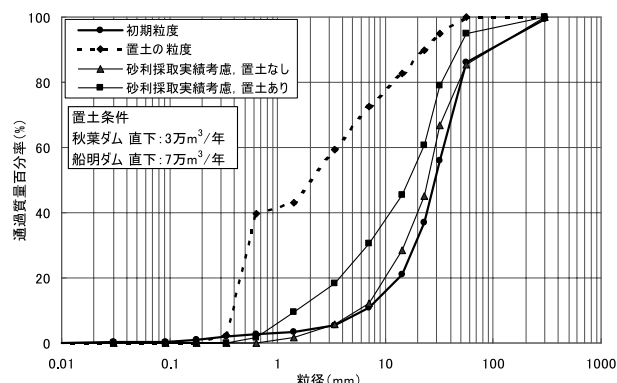


図-16 河床材料粒度分布 (船明ダム～鹿島)

年の河床材料調査の実績値であり、各ケースの値は63年後の計算結果（交換層の値）である。河床変動が小さい秋葉ダム～気田川合流点では、粒度分布がわずかに細粒化する傾向が認められる程度である。また、還元土砂量が大きくなる船明ダム下流では、細粒化の傾向がより顕著に表われている。なお、河床低下傾向を示す鹿島～河口では、この規模の土砂還元では当該区間の河床材料の粗粒化傾向を緩和するには至らない計算結果であった。

4. 天竜川における下流土砂還元試験と他ダムの事例

4.1 土砂還元試験の実施概要

天竜川では1998年から2001年まで電源開発（株）が管理する船明ダムおよび秋葉ダム下流で土砂供給試験が行われた。その概要と筆者らが提供を受けた資料

をもとに、現在実施されている他ダムの事例を合わせて表-2、図-17および図-18にまとめた。以下に、これら事例と比較しながら天竜川の下流土砂還元試験について考察する。

4.2 土砂還元試験の実施方法

a) 土砂還元試験の実施体制

天竜川では土砂供給試験にあたって河川管理を担当する国の出先事務所が事務局となり、学識経験者（河川工学と生物生態学）、河川管理者、ダム管理者、沿川自治体、漁業団体および砂利採取業組合からなる天竜川土砂供給試験検討協議会が設置され、試験に関する情報交換と関係者の合意形成が図られた¹²⁾。土砂の浚渫・運搬・仮置きはダム管理者が実施し、下流河川の環境変化は河川管理者が中心になって監視・観測した。この体制は土砂供給を中断した2002年以降も現況調

表-2 下流河川還元試験の主な実施例

ダム名	河川名	流域面積 (km ²)	所在地	実施年度	試験実施目的 (外的要因)	運搬距離 (km)	還元土砂量 A (×10 ³ m ³ /年)	ダム年平均堆砂量 B ^{*4} (×10 ³ m ³ /年)	還元土砂量の比率 A/B (%)
秋葉	天竜川水系 天竜川	4,490	静岡県	1998 ~2001	下流河床低下防止 海岸侵食防止	秋葉 5 船明 23	18~20	300	6.0~6.7
三春	阿武隈川水系 大滝根川	226	福島県	1998 ~2003	①下流河床低下防止 ②下流の粗粒化防止	4.5	1.0	149	0.7
二瀬	荒川水系 荒川	260	埼玉県	1998, 2001~03	魚類(カジカ)の 生息環境の改善	6	3, 8.8, 13	101	3.0~12.9
長島*1	大井川水系 大井川	958*2	静岡県	2000 ~2001	①土砂還元計画作成 ②下流河川環境への 影響把握	採取地点 により 3, 8	20, 25	243*3	8.2~10.3
浦山	荒川水系 浦山川	51	埼玉県	2000, 2003	①魚類生息環境改善 ②粗粒化防止	5.5	1, 7	144	0.7~4.9
蓮	櫛田川水系 蓮川	80	三重県	2002, 2003	①アユ生息環境改善 ②河床低下防止	4	0.3, 1	29	1.0~3.5
二風谷	沙流川水系 沙流川	1,215	北海道	2002, 2003	下流河川環境改善	10, 20 (2地点)	1, 1.4	764	0.1~0.2
下久保	利根川水系 神流川	322	群馬県	2003	ダム下流三波石峡 の景観保全	12	1	241	0.4

*1: 長島ダムでは、ダム下流の塩郷堰堤下流を使って試験は行われた

*2: 塩郷堰堤での流域面積

*3: 長島ダム貯砂ダム資料¹¹⁾

*4: 2000年度資料

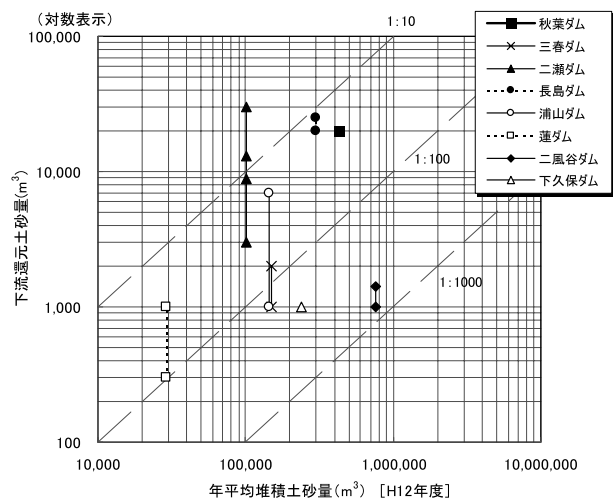


図-17 年平均堆積土砂量と還元土砂量の関係

査を継続している。

下流河川還元を試みている他のダムではこれほど組織的な協議体制はとられていないようである。なお、本格的なフラッシング排砂が行われている黒部川ではこれまでの経緯から、さらに徹底した関係者の合意形成組織が確立されている¹³⁾。

b) 還元土砂の採取と運搬およびその土量と粒度分布

秋葉ダムにおける試験では、貯水池内でクラブ浚渫船により採取し、11tダンプトラックで船明ダム直下

流(約23km)および秋葉ダム直下流(約5km)まで運搬された。

各試験ダムにおける貯砂ダム堆積土の掘削は、バックホウを使用した陸上掘削が主体であり、貯砂ダムの位置する貯水池上流端から還元位置である堤体直下流付近までの運搬は、ダンプトラックによることが一般的である。なお、三春ダムでは前貯水池から一度処分地(ストックヤード)に搬出したものをさらに下流に仮置きしている。

秋葉ダムにおける試験では約2万m³の土砂が一度に仮置きされた。秋葉ダムの年平均堆砂量に年間砂利採取量を戻した量の6~7%にあたる。60%粒径は10数mmである。他ダムの事例では、還元土砂量は年間300~25,000m³であり、ダムの年平均堆砂量に対して0.1~10%の範囲となっている(図-17)。還元土砂の粒度分布は、砂~礫分が主体である。三春ダムではシルト分を含む土砂を用い、また数cmの礫を含む場合も見られる(図-18)。

c) 仮置き方法とその流下状況

秋葉ダム下流への供給試験では、ダム直下流左岸発電放水路設置に伴う河床保護工(鉄筋コンクリート構造)の天端が使われた。ここでは仮置き盛土の幅は上記護床工の構造から概ね28mであった。一方、盛土

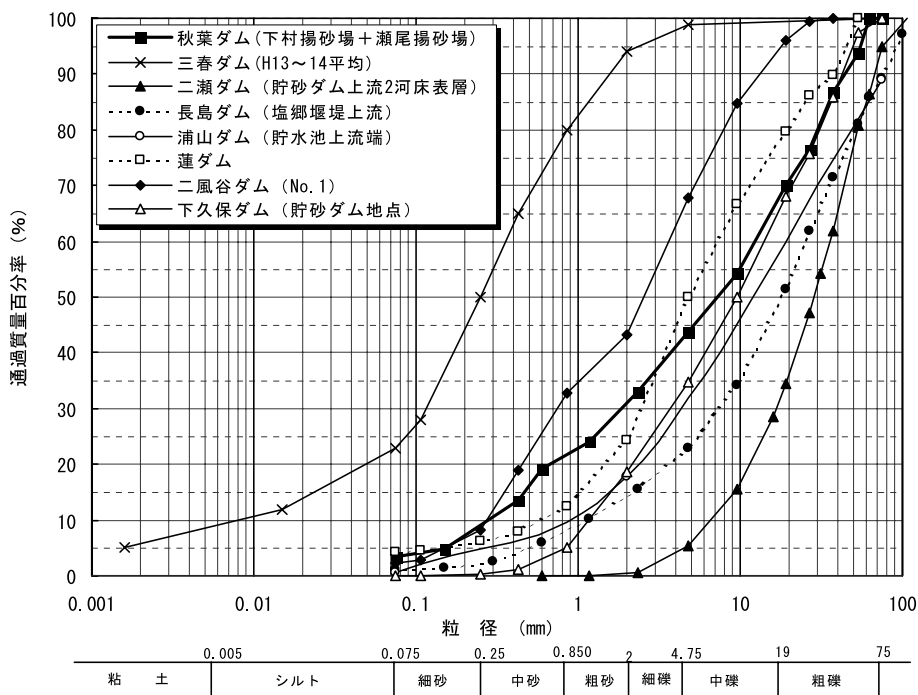


図-18 還元土砂の粒度分布

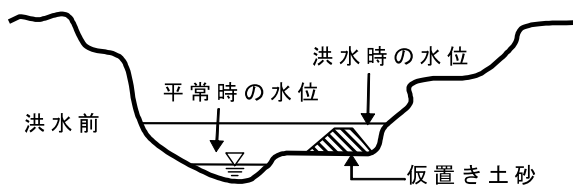


図-19 河川還元概念図

の長さは、山本¹⁴⁾による自然河川における河川の浸食幅と河床勾配の関係および河岸浸食長（上下流方向の長さ）と側方侵食幅の関係などを参考に約 130 m とされた。

また、仮置き土砂が浸水し始める流量は約 400 m³/s であり、盛土天端標高は、仮置き土砂を確実に流下させることを目標に 3 回/年程度の流量（約 1,500 m³/s）で仮置き土砂が水没するように設定され、約 2.8 m の盛土高となった。ここに仮置きされた土砂が流下すると追加仮置きされる。仮置き開始時期は各年とも 3 月であり、他ダムの事例でも非洪水期の末期の場合が多い。

河道に仮置きした土砂は通常の水量で流下するのではなく、洪水により川の水が濁り始めてから流下するように仮置きされる例が多い。すなわち、平常時は仮置き土砂が浸水して、濁水発生源にならないような標高に敷土し、流量の増加に伴い河岸浸食するメカニズ

表-3 秋葉ダムにおける還元土砂の流下状況

年	対象出水	最大放流量 (m ³ /s)	流下土砂量 (m ³)
1998 年	6.19 ~ 7.4	2,261	2,500
	8.26 ~ 9.4	515	7,500
	9.16 ~ 9.20	1,045	
	9.21 ~ 10.30	3,078	
小計			10,000
1999 年	5.27 ~ 5.29	929	3,800
	6.24 ~ 7.19	4,455	7,700
	9.15 ~ 9.17	1,466	10,000
	9.21 ~ 9.30	1,484	1,200
2000 年	6.9 ~ 6.12	577	2,200
	6.25 ~ 7.2	1,152	8,400
	9.11 ~ 9.25	3,366	12,000
2001 年	6.19 ~	1,303	1,800
	8.21 ~ 8.22	1,411	10,000
	9.10 ~ 9.11	1,511	3,200
	10.1 ~ 10.2	996	3,000
小計			63,300
合計			73,300

ムを利用し、さらには年数回の洪水により完全水没流れになるような仮置き土砂天端標高として、全ての土砂を下流に流下させるものである（図-19 参照）。

秋葉ダムにおける流下状況を、写真撮影と簡易測量により整理した結果を表-3 に示す。これより、還元土砂は年数回程度発生する 1,500 m³/s 程度の洪水で全量が流下していることがわかる。他ダムの試験事例でも年数回程度起こる出水により、法面が洗われ流失していく場合もあるが、完全に水没して流失する場合は

表-4 影響調査項目および調査結果 (天竜川土砂供給試験検討協議会 資料)

主な調査項目		主な調査結果
1998年	水質調査3地点(出水時)(船明ダム～掛塚橋) 横断測量6地点(仮置地点下流500mピッチ) 河床材料調査(粒度試験)7地点	横断測量結果より区間26.0～28.5kmで230,000m ³ の土砂が流出。仮置き土砂約10,000m ³ は流出し、どこまで到着したかは不明。 玉石の間に砂が詰まり鮎の生育等に影響があったとの指摘あり。
1999年	水質調査4地点(出水時)(秋葉ダム湖～掛塚橋) 横断測量(船明ダム堆砂測量により実施)	船明ダムの堆砂測量の結果から、285,000m ³ の堆積あり。そのほとんどは、船明ダムの死水容量内であった。気田川からの流入土砂量は不明。 うなぎのすみかに砂が詰まり影響が出ているとの漁協からの指摘あり。
2000年	水質調査4地点(出水時)(秋葉ダム湖～雲名橋) 横断測量(船明ダム堆砂測量により実施) 流石調査	船明ダムの堆砂測量の結果から、73,000m ³ の土砂の減少が見られた。 年1回の堆積測量では、土砂供給試験による土砂の移動量を把握できない。
2001年	水質調査4地点(出水時)(秋葉ダム湖～雲名橋) 横断測量, 河床材料調査, 魚類調査, 底生動物調査, 付着藻類調査: 各9地点(秋葉ダム～気田川合流点)	横断測量の結果としては、出水ごとに断面形状は変わっている。 底生動物調査・付着藻類調査では、出水による個体数の減少が見られた。 魚類調査等の環境調査が不十分であった。
2002年	水質調査4地点(出水時)(秋葉ダム～鹿島橋) 横断測量, 河床材料調査: 各4地点(秋葉ダム～雲名橋), 魚類調査, 底生動物調査, 付着藻類調査: 各1地点(秋葉ダム～鹿島橋)	濁水の供給源が複数あり、(流出に)時間的なズレが生じている。 底生動物調査・付着藻類調査では、同一の区間でも水深の大小流速の大小によって、調査結果が大きく異なる。
2002～2003年	水質調査7地点(出水時)(佐久間湖～掛塚橋) 横断測量: 定期3次元地形計測(平岡～河口) 魚類調査, 底生動物調査, 付着藻類調査: 毎月と出水後 各4地点(中部大橋, 竜山大橋, 鹿島橋, 掛塚橋)	中間報告: 竜山大橋では放流魚以外の魚数が他地点と比べ少ない

表-5 各ダムの下流還元実験におけるモニタリング項目

		秋葉	三春	二瀬	長島	浦山	蓮	二風谷	下久保
仮置き土砂の流下状況	横断測量	○	○		○			○	○
	河床形状								
河床材料	瀬・淵調査		○	○		○			
	自然裸地分布調査					○			
	粒度分布	○	○			○		○	○
水質	トレーサー調査	○	○						
	河床構成材料調査		○			○			
	濁度	○	○					○	
	SS	○	○			○		○	
	DO							○	
	COD		○					○	
	BOD		○					○	
水温		○					○		
pH		○					○		
その他	○								
動植物	魚類	○	○	○	○	○		○	
	付着藻類	○	○	○	○			○	
	底生動物	○	○	○	○			○	
	植物		○	○	○				○
	その他		○	○	○				
景観		○						○	

概ね全量が流下している。

4.3 下流河川環境の影響調査

a) モニタリング概要

秋葉ダム下流土砂還元試験における下流河川でのモニタリング項目とその結果は表-4のとおりである。一般に排砂に伴う下流河川への影響は、排砂時の濁りやDOなどの水質の短期的変化が生物群集に及ぼす短期的な影響と、物理環境や生物環境の変化に現れる中長期的な影響に分けられる。後者には長期間のモニタリングが必要である。

河川還元方式による排砂では、予め還元する土砂の

量や質を選別することが可能であり、負の影響については計画段階の検討により、ある程度回避や制御が可能である。また、下流河川の環境改善を目的とした還元試験では、環境改善の確認に調査の重点を置くこともできる。

表-5に各ダムで行われたモニタリング項目を示す。秋葉ダムでは2000年、2001年と環境調査の焦点が絞られてきたが、影響の評価は難しく、2002年以降は、比較のためのデータを得るために供給なしの状態についての基礎調査が行われている。秋葉ダムにおける土砂供給試験は、河川環境に負の影響を与えないように配慮されたこと、主として仮置き土砂の流下の確認を目標とするものであったことから、この試験の範囲では、有意な影響を見出すことはできていない。他のダムでも同様に土砂還元の効果を分離するのは難しい。

b) 仮置き土砂流下に伴う河床の変化

年1回の縦横断測量結果からは、土砂還元による下流河道の河床変化を分離把握するのは困難である。河床の変動は河川の最大流量との関係によるものが大きい。秋葉ダムでは放流量が大きい1999年は船明貯水池では堆積傾向、放流量がやや小さい2000年は船明貯水池では侵食傾向という結果であった(表-4)。結局、数十年にわたる河床変動シミュレーションの土砂供給の有無による差をもって影響もしくは効果と見る他はなく、モニタリングも年ごとの流況の変動や土砂供給の有無を併せたもので見て行くことになる。

また、河川を一次元的な河床変動で見ていくだけで

は下流還元の効果を表現するのに十分ではない。土砂供給は砂州表層の更新や砂州の発達等とも関係があると見られており、フレッシュな砂州の維持、河道の単列化や河道内の樹林化の進行を防ぐ効果が考えられる。それを明らかにするための計測も検討していく必要がある。

一方、三春ダムでは河床表層構成材料の粒度構成に細粒化の傾向が確認されている¹⁵⁾。また、下久保ダムでは土砂還元によりダム下流約 3.8 km 区間の国の名勝および天然記念物「三波石峡」に指定されている四十八の各名石が研磨されて白色になり、景観復元に効果をあげた¹⁶⁾。

c) 水質調査

一般に濁度および SS 濃度は、出水時の流量の増加とともに大きくなり、流量の減少とともに低下している。長島ダムでは仮置位置の上下流で SS 濃度が計測比較されたが、明らかな差は生じていない¹¹⁾。また魚類の生息に重要な意味をもつ DO 値をチェックするケースもある。

仮置きによる土砂還元では、本格的なフラッシング排砂と異なり、河道への供給土砂量およびその粒径が限定されており、SS 濃度や DO 値などの水質に対する影響は限定されるものと考えられる。

d) 生物調査

魚類への影響については、秋葉ダムでは当初、漁業団体から問題の指摘があったものの、場所、被害の程度等具体的な状況は不明であった。三春ダム、二瀬ダムなどでは漁業団体は土砂還元試験を魚類の育成にとってプラス要因が大きいと好意的に見ているようである。

付着藻類や底生生物では、出水による一時的な種類と個体数の減少とその後の回復という傾向はみることができたが、土砂還元との関連は明確ではない。

5. 河川還元方式の課題

5.1 河川還元と河川管理の目標

粗粒土砂を還元する場合、現在と同じ河床高と河床勾配ではなく、ある程度上流から河床を高め、勾配を大きくしながら河床材料を動かし、交換しつつ流下するものと考えられる。この場合、河川の洪水水位が所定

の高さより高くなり、周辺の土地利用等に大きな影響を及ぼさないよう、適切な洪水水位に収まるよう河床高を制御する必要がある。一方、細粒土砂の還元はスムーズな流下は可能であるが、高濃度濁水の発生の可能性があり、それを回避するため何らかの対策が重要となる。

また、これらの還元土砂はその量と粒径の大きさによって、河口から周辺海岸へ土砂を流送することによる海岸浸食の緩和や河道砂州の形態を維持しコアジサシの集団営巣の場として保存することなど河川管理上の目標にそって行われることになろう。土砂の量と質をめぐり貯水池堆砂管理と下流河川管理の一体的推進体制を構築することが必要である。

5.2 輸送コストの低下

ダム機能を維持するための土砂還元は半永久的に実施しなければならないことになる。河川還元方式を堆砂対策の一手法として位置づけて行くためには、コストの低減が重要な課題となる。トラックの輸送による土砂還元費用（掘削、運搬および敷き均しのトータル費用）は、10 km で 2,500 円/m³ 程度と見られる。運搬距離が長くなるほど、費用も大きくなる。このため、輸送コストを低減させることが、土砂還元に係る費用を低減することにつながる。このことより、貯水池内での水上輸送など輸送の合理化をはかる技術開発が必要である。

また、今回の検討では、船明ダム貯水池上流部の河床上昇が制約条件となると考えて、秋葉ダム直下流に毎年 3 万 m³、船明ダム直下流に毎年 7 万 m³ を還元する計画案とした。今後、この区間の河床上昇の原因を明らかにし、河床の整正等により、秋葉ダム直下流の還元土砂量を増加させることができれば、運搬距離を減じ輸送コストの低下につなげることができる。

5.3 下流河川環境モニタリングと社会の受容

河川還元方式が現在、数ダムにおいて試験として実施されているが、河川海岸域の生物等への影響については十分な知見が蓄積されていない。したがって、還元試験を長期にわたって実施しつつ、モニタリング調査により、土砂還元に伴う下流河川の物理環境の変化と、それが生物へ与える影響についての調査研究を進めていく以外にその解明の方法はないと考えられる。

この方式は順応的管理, すなわち「試験しながら, 検証し, 技術的發展を遂げる」という考え方¹⁷⁾に基づいている。こうした管理方針が支持されるには計画立案から現地での検証までの過程が透明で妥当性が高いものでなくてはならない。このため, 学識経験者はもとより, 同じ河川流域の漁業従事者団体や環境保全団体等関係者と開かれた場で情報を共有し, 本方式が社会に受容されるように努めていくことが重要である。

6. 結 論

本研究の結論を以下のとおりまとめることができる。

- (1) 佐久間ダム貯水池デルタ上流部には相対的に粗粒径の土砂が分級されて堆積しており, さらに流水掃砂による粗粒化も指摘されている。この部分の堆砂を除去する方法は掘削・運搬による他は有効な方法はない。
- (2) 現在, 行われている3つの対策に加え, 貯水池上流部で毎年10万m³程度を掘削除去すれば, 17年間のシミュレーションでは, ほぼデルタ上流部の河床高の上昇を抑えることは可能のようである。
- (3) 秋葉ダム下流河道は佐久間ダム等による流砂の遮断と現在も続く砂利採取による影響で河床は大きく低下している。低下の動向は砂利採取の動向に深く関係し, ダムは河床材料の粗粒化に影響していると見られる。
- (4) 佐久間ダム貯水池内のデルタ上流部に堆積した土砂を何らかの方法で運搬し, 下流河道に土砂還元する場合, 下流河道の63年間の河床変動計算結果より, 1963~2000年の最高河床高を上回らないという条件で秋葉ダム直下流に毎年3万m³, 船明ダム直下流に毎年7万m³を還元することが可能と見られる。
- (5) 同じ河床変動計算結果からは, 下流河川還元により, 還元土砂量が大きく, 還元地点に近い船明ダムから鹿島では, 河床材料の細粒化が認められるが, 一方, 河床変動が小さい秋葉ダム~気田川合流点や, 河床低下傾向を示す鹿島~河口では, この規模の土砂還元では河床材料の粗粒化傾向を緩和するまでには至らない。
- (6) 4年にわたって行われた秋葉ダム下流等への土砂供給試験では, ダム直下流河川を中心に各種調査が試みられたが, 還元土砂量が限定されており, 現時点では正負の両面からの影響評価は困難である。
- (7) 今後, 適正な量と質の土砂供給であれば, 流砂環境の回復が下流河川の河床変動や生物生息環境に大きな影響を与えず, かつ, その改善に役立つことを明らかにする必要がある, 制御しやすい土砂供給試験によりそれを実証的に明らかにしていくことが重要である。
- (8) その際, ダムから河川を通じて海岸に至る流域関係者が開かれた場で情報を共有しつつ河川還元の影響・効果を確認していくことが社会的な認知をうけるために不可欠なプロセスである。

なお, 本研究では, 土砂還元に伴う河床変動計算では検討の考え方を示すために河床変動を区間平均で表すなど, 簡略的に扱っている部分がある。今後, 還元土砂量および質の決定には, さらに詳細な検討が必要である。

本論文は, 参考文献に記したものの以外に, 各ダム管理所から提供頂いた資料をもとにまとめたものであり, ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡野眞久, 梅田 信, 田中則和, 横森源治: 洪水時におけるダム貯水池流入微細粒土砂の挙動把握と貯水池堆砂管理への応用, 土木学会河川技術論文集, **9**, 73-78, 2003
- 2) 岡田 剛, 馬場恭平: 佐久間貯水池堆砂とその排除計画について, 大ダム, No. 102, 103 合併号, 84-93, 1982-12・1983-3
- 3) 竹橋勝博, 佐藤浩明, 湯川正嗣: 天竜川水系ダム群の堆砂対策, 電力土木, No. 238, 55-63, 1992
- 4) 菊池浩一郎, 村永峰男, 板楠勝国: 佐久間ダムの堆砂状況と対策, 電力土木, No. 291, 41-45, 2001
- 5) 岡野眞久, 安田佳哉, 森 耕司: 天竜川中流部のダム貯水池群が流砂系に及ぼす影響について, 平成15年度ダム水源地環境技術研究所所報, pp. 26-37, 2004
- 6) 新庄高久, 藤田裕一郎: 発電用大規模貯水池(佐久間貯水池)における堆砂に関する考察, 水工学論文集, **48**, 1153-1158, 2004
- 7) 建設省河川局監修: 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説調査編, 山海堂, pp. 107-111, 1997

- 8) 土木学会：水理公式集（平成 11 年版），丸善，p. 175，2000
- 9) 前出 8)：p. 163
- 10) 芦田和男・高橋保・道上正規：河川の土砂災害と対策，森北出版，pp. 36-39，1983
- 11) 岡野真久，仁木兼二，松井初男，藤井隆弘：貯水池堆砂をダム下流河川に還元する排砂方式の導入，第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集，pp. 201-206，2002
- 12) 岡野真久，菊井幹男，石田裕哉，角 哲也：ダム貯水池堆砂とその下流河川還元についての研究，土木学会河川技術論文集，**10**，191-196，2004
- 13) 進藤裕之：黒部川におけるダム排砂，第 3 回世界水フォーラム流域一貫の土砂管理論文集，pp. 75-85，2003
- 14) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，pp. 173-182，1994
- 15) 伊藤尚敬：三春ダム下流河川における土砂供給試験，ダム技術，No. 193，64-69，2002
- 16) 下久保ダム HP，2004
- 17) 中村太士：ダム影響評価の背景と課題—特集を編集するにあたって—，応用生態工学，**2** (2)，101-102，1999

(2005 年 5 月 10 日受理)

Comprehensive sediment management in reservoirs is required to preserve the capabilities of water resources facilities and to conserve the environment in rivers and coastal areas downstream of the reservoir. As one means of achieving the goals, 'sediment replenishment' has been carried out to excavate some of the sediment deposited in reservoirs, transport it to downstream of the dam, and discharge it into downstream rivers and finally into the sea with floodwater. This paper identifies the characteristics of sediment deposited in the Sakuma Dam reservoir in the Tenryu River and discusses the effects of 'sediment replenishment' on river bed changes. One dimensional numerical simulation shows that appropriate sediment excavation from the upper part of the Sakuma Dam reservoir and sediment supply to downstream rivers will contribute to maintaining both reservoir and river bed levels, and mitigating the armoring of river bed materials in rivers downstream of the Akiha and Funagira Dams. Consensus building among several stakeholders should be necessary to continue sediment replenishment for a long time successfully.

Key words: reservoir sedimentation management, one dimensional numerical simulation, sediment replenishment, consensus building