

## 14.4 貯水池および貯水池下流の流れと土砂移動モデルに関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水工研究グループ（河川・ダム水理）

研究担当者：箱石憲昭、海野仁、福島雅紀、櫻井寿之

### 【要旨】

ダム事業の円滑な展開、また、既設ダムの環境影響低減のためには、ダム建設や、ダム管理上の各種対策により生じる環境の変化を適切に予測するためのシミュレーション手法の確立が必要である。シミュレーション手法については、漸次研究が進められているが、現象の複雑さ、フィールドデータの少なさから、未だ確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、貯水池および貯水池下流河川の流れと土砂移動のモデル化を目標に、①懸濁物質の沈降、再浮上条件の解明とモデリング手法の開発、②貯水池流入土砂及び貯水池下流河川の土砂移動特性の解明とモデリング手法の開発、③気象条件が貯水池及び貯水池下流河川に与える影響の解明とモデリング手法の開発、④貯水池及び貯水池下流河川の流れを再現する高次元数値シミュレーションソフトの開発を行っている。

21年度は、過年度に引き続き懸濁物質沈降速度の分析手法の比較検討を行うとともに、懸濁物質の粒子形状について検討した。山地河道の土砂移動特性を把握するために、ダム貯水池上流河川の現地調査および混合砂礫流送実験を継続して実施した。また、これまでに開発・改良を行ってきた二次元河床変動モデルを新たに得た置土侵食の観測データを対象に適用した。

その結果、粒子形状が沈降速度に与える影響を把握するとともに、各試験方法の特性をとりまとめた。現地調査により、小規模出水時の山地河道の河床変動及び土砂移動特性を把握した。混合砂礫流送実験から、大きな石が流砂量に与える影響を定量的に把握した。開発した二次元河床変動モデルを用いることにより、複数の出水における置土侵食の傾向が再現できることを確認し、側岸侵食予測に課題があることを把握した。

キーワード：ダム貯水池、土砂移動、沈降試験、平面二次元河床変動モデル、混合砂礫流送実験

### 1. はじめに

ダム事業の円滑な展開、また、既設ダムの環境影響低減のためには、ダム建設やダム管理上の各種対策により生じる環境の変化を適切に予測するためのシミュレーション手法の確立が必要である。シミュレーション技術は、近年の計算機の性能向上と共に進歩しているが、シミュレーションモデルによる貯水池の堆砂・濁水現象、貯水池下流河川の河床変動予測や各種対策の効果等の予測精度については、その現象の複雑さや現地データによる検証の不足から、依然として十分とは言えない状況にある。

そこで、本研究では、環境影響評価や各種堆砂対策の検討において現象予測のためのツールとして用いられる数値シミュレーションモデルの開発を行うとともに、そのパラメータの設定手法やモデルの改良方法について検討を行っている。

21年度は、懸濁物質沈降速度の分析手法の比較検討、

懸濁物質の粒子形状についての検討、山地河道の土砂移動特性を把握するためのダム貯水池上流河川の現地調査および混合砂礫流送実験、これまでに開発・改良を行ってきた二次元河床変動モデルの新たな置土侵食観測データへの適用を実施しており、得られた知見を報告する。

### 2. 微細粒子土砂の沈降に関する検討

#### 2.1 概要

従来、貯水池の濁水シミュレーションにおける土粒子の沈降速度の設定では、採水した濁水をレーザー回折・散乱法により粒度分布を分析し、これによって得られた粒径からストークス式を用いて沈降速度を設定する手法が用いられてきた。しかしながら、レーザー回折・散乱法（以下、「レーザー回折法」と略す。）による粒度分布は、沈降実験をもとにした粒度分布と異

表-2.1 粒度分布の分析手法

測定方法	沈降筒法	透過性遠心沈降法	レーザー回折・散乱法
測定計測器	沈降筒 φ200mm×L2m(約63 $\frac{1}{2}$ 分) φ390mm×L2m(約240 $\frac{1}{2}$ 分)	SKC-2000	SALD-3000S
測定条件	室温一定(20℃)	測定範囲:0.3 $\mu$ m~50 $\mu$ m	測定範囲:0.05 $\mu$ m~3000 $\mu$ m
測定項目	沈降筒水位、SS、蒸発残留物、水温	粒度分布	粒度分布
測定手順	初期水深を2.0mとし、底面から0.5mの位置に採水用コックを設置し、測定回数毎に1リットルの採水を行う。	採水した試料100mlを測定装置に投入し、測定を行う。	試料濃度に応じた量(50~100ml程度)を測定装置に投入し測定を行う。
測定回数	13回 (0時間後、15分後、30分後、1時間後、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、3日後、7日後、14日後、21日後、42日後)	1回	1回
粒度分布算出方法	粒子の沈降速度を沈降筒水位と採水経過時間より算出する。沈降速度からストークス式により粒径を換算し、濁水の濃度変化から通過率を算出する。	遠心力により強制的に粒子を沈降させ、沈降時間と遠心力付加時間毎に光の通過量を計測し、濃度変化を測定する。濃度の変化より通過率を算出し、その後、沈降速度を用いてストークス式より粒径を換算する。	土粒子にレーザー光を照射し、土粒子からの回折光の光強度を計測する。計測した光強度にMie散乱理論を適用し、粒子径区分毎の粒子量を求める。
汎用性	測定方法の詳細が統一されていない。	測定計器自体が少ない。	一般的によく用いられる。

なる場合があり、適切な粒度分布の調査方法、条件設定方法の確立が求められている。

平成18年度の研究では、貯水池から採取した底泥を試料に濁水を調製し、レーザー回折法により粒度分布を求めたところ、沈降筒法あるいは遠心沈降法により求めた結果に比べ粗粒化すると報告した。19年度は沈降筒法を取り上げ、実験条件の設定方法について検討した。20年度は、現地から採水した濁水を試料に、分析方法の違いが粒度分布に及ぼす影響を比較検討した。21年度は、過年度に引き続き分析手法の比較検討を行うとともに、濁水の粒子形状について観察した。以下、21年度成果について報告する。

## 2.2 分析手法の比較検討

### 2.2.1 実験方法

沈降筒法、遠心沈降法、レーザー回折法を取り上げ、分析手法の改良と分析結果の比較検討をおこなった(表-2.1)。実験に先立ち、川治ダム堤体近傍から新たに底泥を採取し、濁質濃度がおよそ500[mg/L]となるよう模擬濁水を調製した。ここで、沈降筒法は、実験により沈降速度を計測し、ストークス式により粒度分布を換算するものである。遠心沈降法は、遠心分離機を使って沈降試験の時間を短縮した手法である。レーザー回折法は、測定装置により直接粒度分布を求め

るものである。以下に沈降筒法による粒度分布の換算方法を記す。

○沈降筒法による粒度分布の換算方法

①水中の粒子は、経過時間 $t$ の間に水面から採水地点までの距離 $l$ を沈降していると考え、この時間 $t$ に対応する平均沈降速度 $w(t)$ は(2.1)式で表される。

$$w(t) = \frac{l}{t} \quad (2.1)$$

②この時間 $t$ の間に沈降したSSの重量比 $F(t)$ は、実験開始時点( $t=0$ )から $t$ までのSSの変化量であるので、(2.2)式で表される。

$$F(t) = \frac{SS_{t=0} - SS(t)}{SS_{t=0}} \quad (2.2)$$

このSSの重量比 $F(t)$ は、時間順として沈降が速いほうからの累計分布として求めている(いわゆるフルイの上)ので、通常の累積分布(フルイの下)に直すのであれば、(2.3)式で表される。

$$F(t) = \frac{SS(t)}{SS_{t=0}} \quad (2.3)$$

③粒子形状が球形である場合、粒子の沈降速度と粒径は、ストークスの沈降速度式により相互に換算する

表-2.2 模擬濁水の分散処理

測定方法	分散方法	
	分散なし	分散あり
透過式 遠心沈降法	分散材:無添加 分散方法:手攪拌	分散材:無添加 分散方法:超音波振動10分間(60w)
レーザー 回折・散乱法	分散材:無添加 分散方法:手攪拌	-----

表-2.3 実験ケース

ケース	濁水	分析方法	分散処理	結果
1	川治ダム 模擬濁水	沈降筒法 φ200mm	なし	図-2.1 図-2.2 図-2.3 図-2.4
2	川治ダム 模擬濁水	沈降筒法 φ390mm	なし	図-2.1 図-2.2
3	川治ダム 模擬濁水	透過式 遠心沈降法	あり	図-2.4
4	川治ダム 模擬濁水	透過式 遠心沈降法	なし	図-2.4
5	川治ダム 模擬濁水	レーザー回折・ 散乱法	なし	図-2.4

ことができる。

$$w_s = \frac{d^2 g (\rho_s - \rho_w)}{18 \mu} \quad (2.4)$$

ここに、 $w_s$ : 粒子の沈降速度、 $d$ : 粒径、 $g$ : 重力加速度、 $\rho_s$ : 粒子密度、 $\rho_w$ : 水(媒質)の密度、 $\mu$ : 水の粘性係数である。これは、ストークス則をベースにSSの減少率から粒径を換算していることから、ストークス径とも呼ばれている。

21年度は、沈降筒法について、2点の改良を加えた。第1点は、恒温室の空調設備を更新し、さらに室内の温度のムラが生じないように、ファンを増設して実験した。第2点は、20 $\mu$ を超える大きな粒径の範囲の粒度分布が求められるよう、充水後15分、30分の採水・分析を追加した。さらに、SSに加え蒸発残留物の分析をおこない、結果を比較した。

20年度の現地採水した試料を用いた実験では、土粒子の分散を促進させることを目的に、一部の実験ケースで超音波分散処理を実施した。本年度の実験においても、遠心沈降法の一部ケースで分散処理を行った。濁水土粒子の分散処理の方法を表-2.2に、実験ケースの一覧を表-2.3に示す。

### 2.2.2 実験結果

#### (1) 沈降筒法

まず、φ200mmとφ390mmの沈降筒について、結果を比較する(図-2.1)。φ390mmの通過百分率は、細粒部である0.8~2 $\mu$ の範囲で、φ200mmに比べ大きくなる結果となったが、全体的にはほぼ同一の分布を示す結

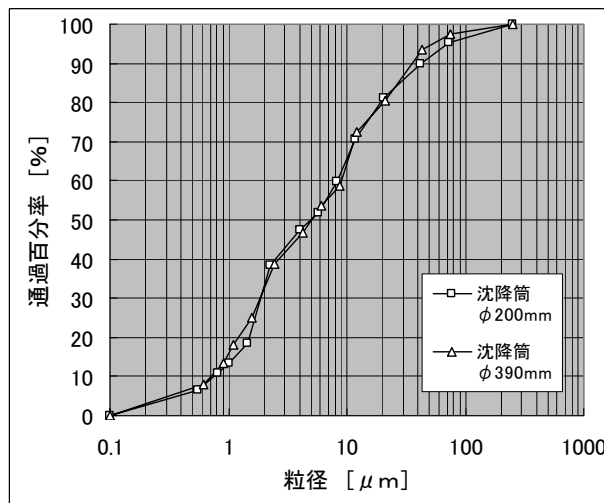


図-2.1 沈降筒法による粒度分布

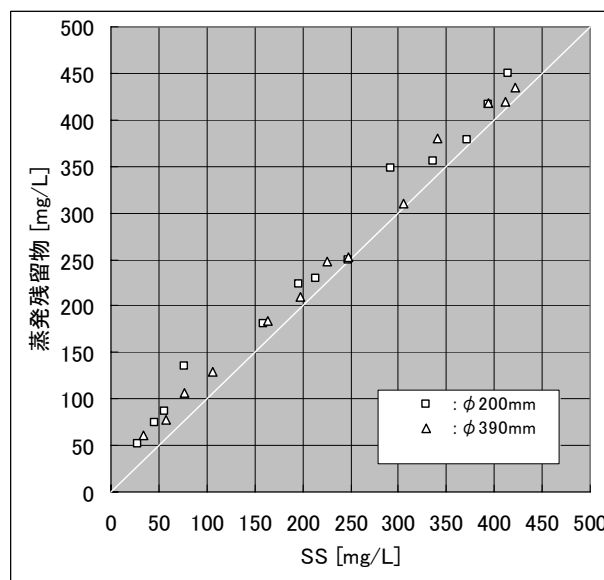


図-2.2 SSと蒸発残留物の相関

果となった。19年度の実験では、沈降筒の径を3種設定し、適切な沈降筒の径として、200mm~390mmを提案したが、恒温室の温度管理を徹底することにより、φ200mmの沈降筒においても、信頼性のあるデータが十分得られるものと思われる。

次に、φ200mmとφ390mmの沈降筒で計26回採水した試料のSSと蒸発残留物を比較する(図-2.2)。SSは水中に含まれる粒子性物質の濃度を、また、蒸発残留物は、粒子性と溶解性の物質の濃度を表す。計26検体の分析から、蒸発残留物はSSより0~60[mg/L]程度大きな値を示し、採水時期、採水する沈降筒によってかなりばらつく結果となった。26検体の差を単純平均すると、23[mg/L]となり、試料とした模擬濁水には平均

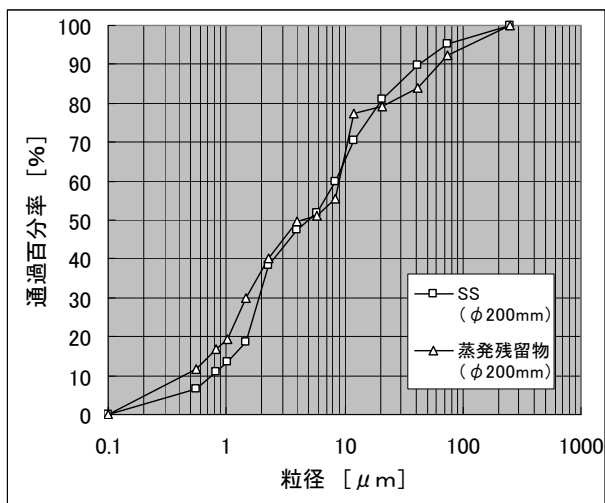


図-2.3 パラメータと粒度分布

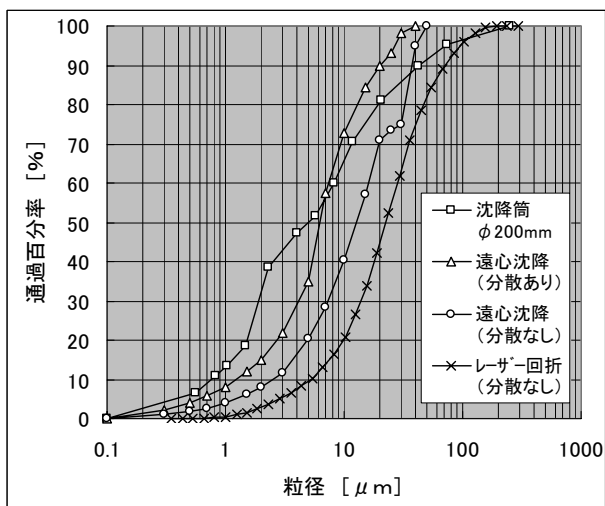


図-2.4 分析手法と粒度分布

23 [mg/L]の溶解性物質が含まれると考える。

$\phi 200$  沈降筒について、SS から求めた粒度分布と蒸発残留物から求めた粒度分布を比較した (図-2.3)。1  $\mu$  以下の細粒分の占める割合は、濁質濃度を SS で評価した場合で 13 %、蒸発残留物で評価した場合で 19 % となり、蒸発残留物で評価すると、SS で評価した場合の約 1.5 倍となった。ストークス径 1  $\mu$  以下の粒子の沈降速度は、8.1cm/day 以下と極めて遅く、大規模出水後の濁水長期化の原因ともなっていることから、濁水中に占める割合を正確に把握することは重要ではある。しかしながら、水域の環境基準は SS で規定され、また、濁質のシミュレーションにおいても、予測する対象は蒸発残留物ではなく SS であることを考えると、沈降筒法で採用する濁質濃度のパラメータは、従来通り、SS とするのが妥当と考える。

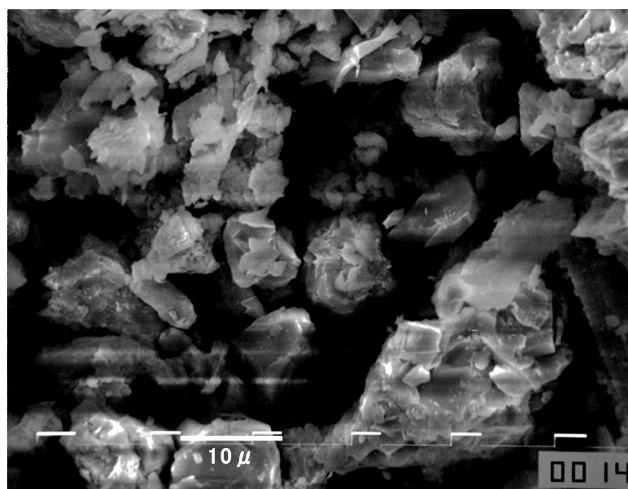


写真-2.1 川治ダム流入濁水 (2000倍)

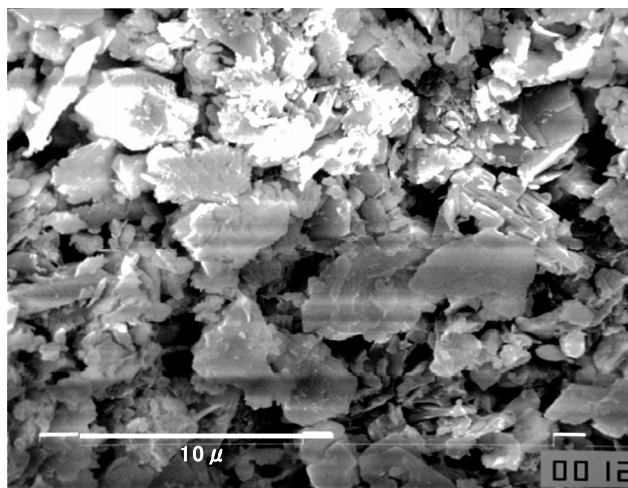


写真-2.2 川治ダム流入濁水 (5000倍)

## (2) 遠心沈降法

沈降筒法 ( $\phi 200\text{mm}$ )、遠心沈降法 (分散あり/分散なし)、レーザー回折法 (分散なし) の 4 手法により求めた粒度分布を図-2.4 に示す。20 年度の貯水池流入濁水を用いた分析では、「遠心沈降法 (分散なし)」のケースが、数  $\mu$  以下の粒径の細かい範囲において沈降筒法と同様の結果となることを示した。しかしながら、21 年度の模擬濁水を用いた検討では、上記 4 手法はかなりの差を生じる結果となった。沈降筒法に一番近い結果を与えるのは、遠心沈降法 (分散あり) のケースであることから、川治ダムの底泥を試料に模擬濁水を製造し、遠心沈降法を用いて粒度分析する場合には、前処理として超音波分散が必要と考えられる。

4 手法のうち、最も粗粒化した粒度分布を示したのは、レーザー回折法である。レーザー回折法は濁水の粒度分析において最も普及した手法ではあるものの、分析結果の利用にあたっては注意を要する。

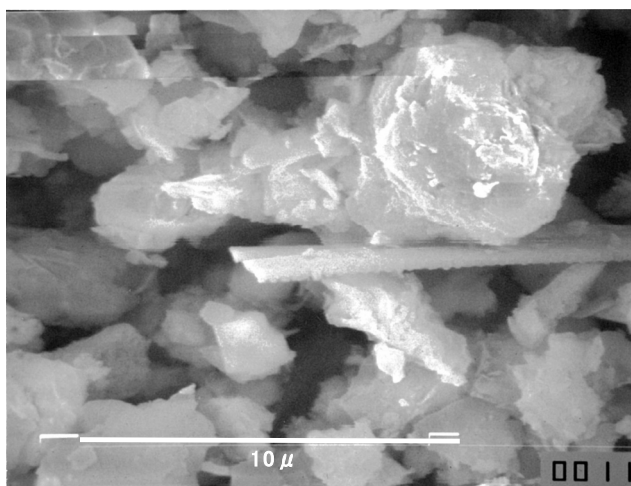


写真-2.3 川治ダム流入濁水 (7500倍)

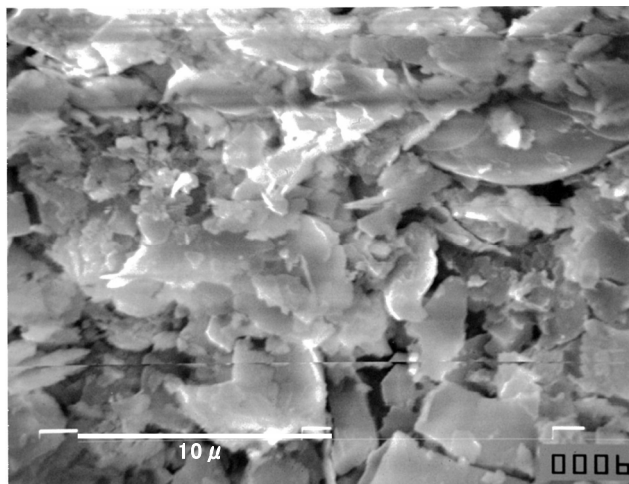


写真-2.5 下久保ダム流入濁水 (5000倍)

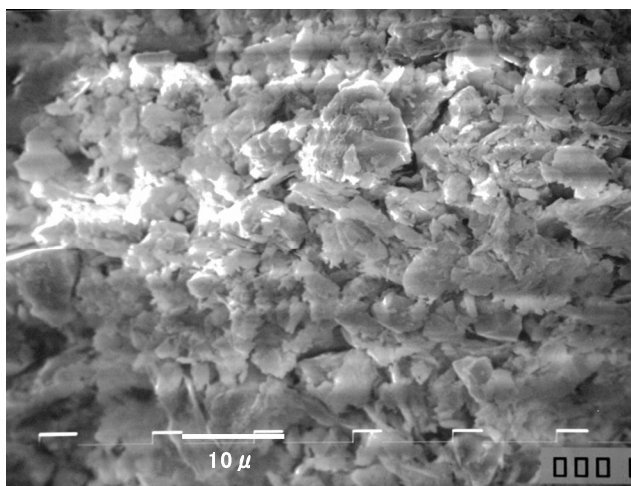


写真-2.4 下久保ダム流入濁水 (2000倍)

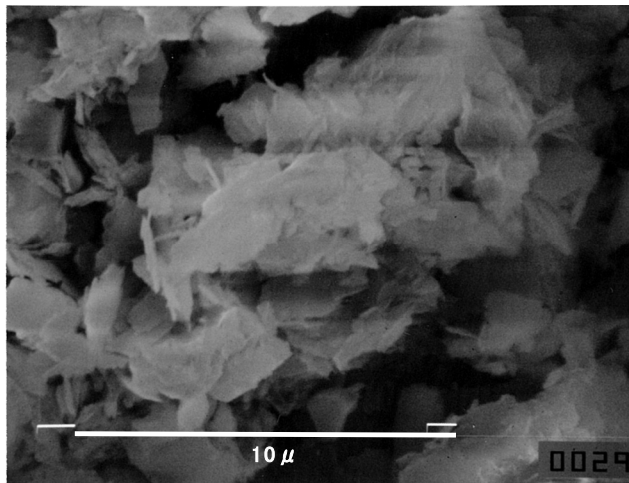


写真-2.6 下久保ダム流入濁水 (7500倍)

### 2.3 濁水粒子の形状観察

既往の多くの実験ケースでは、レーザー回折法による分析が他の手法に比べて粗粒化した結果を示すと報告した。そこで、原因を究明することを目的に、電子顕微鏡を用いて粒子の形状を観察した。形状観察には、川治ダムおよび下久保ダムの流入濁水を用いた。川治ダムから採水した試料は、SS=1,160[mg/L]と高濃度の濁水である。一方、下久保ダムから採水した試料は、SS=42[mg/L]と比較的低濃度である。これらの試料を対象に、粒子の形状を観察した。

川治ダム流入水の粒子形状を、写真-2.1~2.3に、下久保ダム流入水の粒子形状を、写真-2.4~2.6に示す。観察結果を、以下にまとめる。

#### (1) 川治ダム流入濁水

2000倍写真では、10~20 $\mu$ の鱗片状の結晶が概ね球形に集合した粒子と、2 $\mu$ 前後の角ばった破片状の粒子が見られる。5000倍写真では、鱗片状の集合した

粒子が見られる。7500倍写真では、3~5 $\mu$ の鱗片状の厚みのある粒子が主に見られる。

#### (2) 下久保ダム流入濁水

2000倍写真では、5~10 $\mu$ の鱗片状の厚みのある粒子を主体とし、7 $\mu$ 前後の破片状の粒子が見られる。5000倍写真では、5~10 $\mu$ 前後の鱗片状の集合体を主体とし、3~5 $\mu$ の角ばった破片状の粒子も見られる。7500倍写真では、3~5 $\mu$ 前後の不規則な板状粒子が見られる。

#### (3) 考察

形状観察の結果、両貯水池に流入する濁水の土粒子は、主に鱗片状の厚みのある粒子であることが判明した。一方、20年度の研究では、レーザー回折法が沈降筒法、遠心沈降法に比べ、粒径の小さい範囲で粗粒化、つまり、他手法に比べ、大きな沈降速度を示すと報告した。

レーザー回折法は、多様な土粒子の形状を球形状の



図-3.1 調査実施箇所および仮の距離標

粒子の直径に換算して粒度分布を求める手法である。このため、特に鱗片状粒子の場合、球形粒子に置き換えて沈降速度を求めると、過大な値を示すと考えられる。一方、沈降筒法、遠心沈降法は、土粒子の沈降速度を直接あるいは間接的に求めていることから、土粒子の形状にかかわらず、沈降速度を適切に評価できると考えられる。

### 3. 下久保ダム上流での土砂移動特性に関する調査

#### 3.1 調査の目的

ダムの建設前後での河床材料の変化が指摘されることがあるが、建設以前の山地河道に関するデータが不足しているため、ダム建設の影響に関する議論が進まないことがある。近年、新規ダムの建設にあたっては、ダム周辺、特にその下流の河道特性を事前に調査し、建設による影響を河川工学的および生態学的視点から捉え、将来的な変化を予測した上で事業が進められている<sup>3.1)</sup>。また、検討結果に応じた影響の緩和策も検討されている。今後はダム建設後のフォローアップ調査を実施することにより、ダム建設前後の河道の変化をより明確に確認できると考える。一方、ダムサイト近傍は山間部であることが多く、山間部を流

れる河川は山地河道と呼ばれる。この山地河道における河床材料の移動特性については、河床材料が2オーダー以上異なる粒径で構成されており、既往の流砂量式の適用が困難であることも指摘されている<sup>3.2, 3.3)</sup>。

そこで本調査においては、山地河道を対象とした河道特性調査を実施するとともに、土砂の移動特性について調査を試みるものである。山地河道における調査については過去の実績が少なく、調査自体の困難さが想定されたため、以下では調査地の選定から開始した。調査地の選定にあたっては、粒径別流入土砂量の算定が進められているダムについて現地踏査を行い（平成18年度）、アクセスが容易で、露岩も見られ、人工構造物の少ない下久保ダム上流区間を選定した。平成19年度は、下久保ダム上流の延長約8km区間について、河床材料調査を実施するとともに、航空写真から瀬淵構造および河床高を読み取ることで、概略の調査を実施した。平成20年度は、現地調査を中心として河川横断測量、瀬淵構造調査（浮石・沈み石の分布も含む）、河床材料調査を行うとともに、礫の移動状況を調査することとしたが、台風の上陸もなく出水がほとんど発生しなかったことから、礫の移動は全く生じなかった。平成21年度は、平成20年度に上記の変化を確認できなかったことから、同様な調査を実施するものとした。ただし、礫の移動状況に関しては、マーカーを礫に埋

め込んで調査するものであるが、大きな出水が発生した場合、後述する IC タグの通信距離は 40cm 程度と短いため移動後の発見が難しいと考え、低周波発信器付礫も IC タグ付礫と合わせて敷設した。なお、低周波発信器の通信距離は 10m 程度である。

### 3.2 調査実施箇所

図-3.1 に示す調査対象箇所は下久保ダムの貯水池末端部よりも上流に位置する。下久保ダムは、堤高 129m、総貯水池容量 1 億 3 千万 m<sup>3</sup> の多目的の重力式コンクリートダムであり、群馬県藤岡市と埼玉県児玉郡神川町の境界を流れる利根川水系神流川に昭和 43 年に建設された。貯水池末端や上流の柏木地区 (0km 付近) を下流端として、約 8km 上流の大井戸地区までを調査範囲としたものである。なお、ここに示した距離標は河川管理上の距離標ではなく、本調査を実施するために設置した距離標であることを追記する。

平成 19 年度および 20 年度には、昭和 38 年、平成 14 年、平成 19 年および平成 20 年 12 月の航空写真からデジタル図化機で立体画像を作成し、図-3.1 に示すように河道に沿った横断測線を設定し、さらにそれを等分することで設けた約 50m 間隔の測線上で標高を読み取った。その結果得られた平均河床高の縦断図を図-3.2 に示す。ここで、航空写真からの読み取りであるため、水域部は水面の標高が記録されている。調査区間で河床勾配に大きな変化はなく、平均的に 1/140 の勾配であること、川幅は 40~60m 程度であることが確認された。

平成 19 年度に実施した河床材料調査結果からは、平均粒径が 45mm 程度であること、材料 m として 10~200mm の河床材料が卓越することを確認している。ちなみに、平成 19 年度の調査は、1km 間隔で流心および左右岸において面積格子法によって調査した結果である。材料 s としては、0.2~2.0mm の砂が見られ、湾曲部内岸や巨礫等の水裏部などでは 2.0~10.0mm の礫が卓越する箇所もあった。

### 3.3 調査内容

平成 21 年度も昨年度に引き続き現地調査を中心として、①河川横断測量、②瀬淵構造調査、③河床材料調査、④礫の移動状況調査を実施した。それぞれの調査方法を以下に示す。

#### ① 河川横断測量

図-3.1 の横断測線に合わせて、RTK-GPS を用いた地形調査を検討したが、河道が谷間を流れていることか

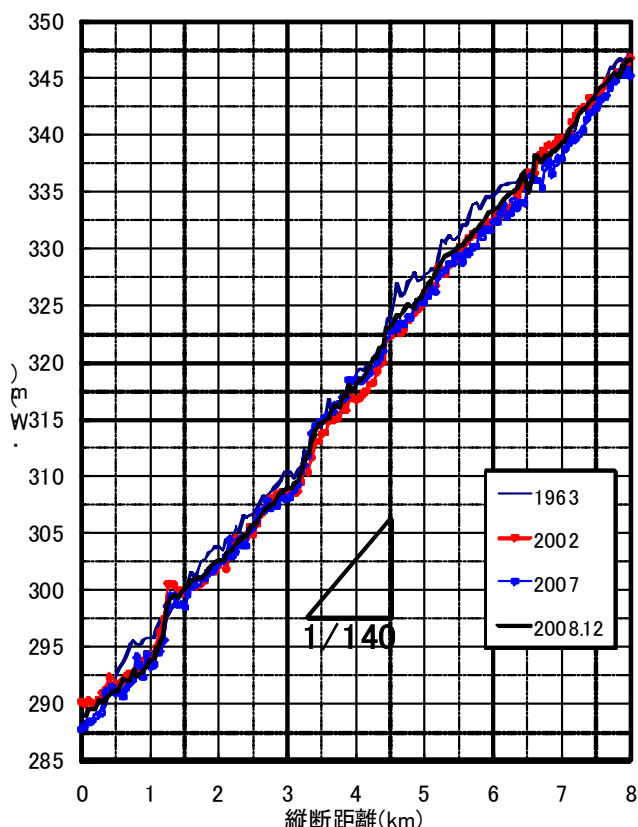


図-3.2 河道縦断形の変化

表-3.1 瀬淵の分類基準

早瀬	水深が浅く流速が早い。水面には白波が立ち河床は礫が浮き石状態であることが多い。
平瀬	水深は浅く流速は比較的早い。水面はしわのような波が立ち河床は沈み石であることが多い。平瀬と淵の
淵	水深は深く流速は緩い。水面は波立たず河床は砂で覆われていることもある。

表-3.2 河床状態の判断基準

物理的分類	生物学的分類	礫の状態
はまり石 ↑	はまり石	
	載り石	
浮き石 ↓	浮き石 (小隙間)	
	浮き石 (大隙間)	



図-3.3 IC タグの埋め込み状況



図-3.4 低周波発信器の埋め込み状況

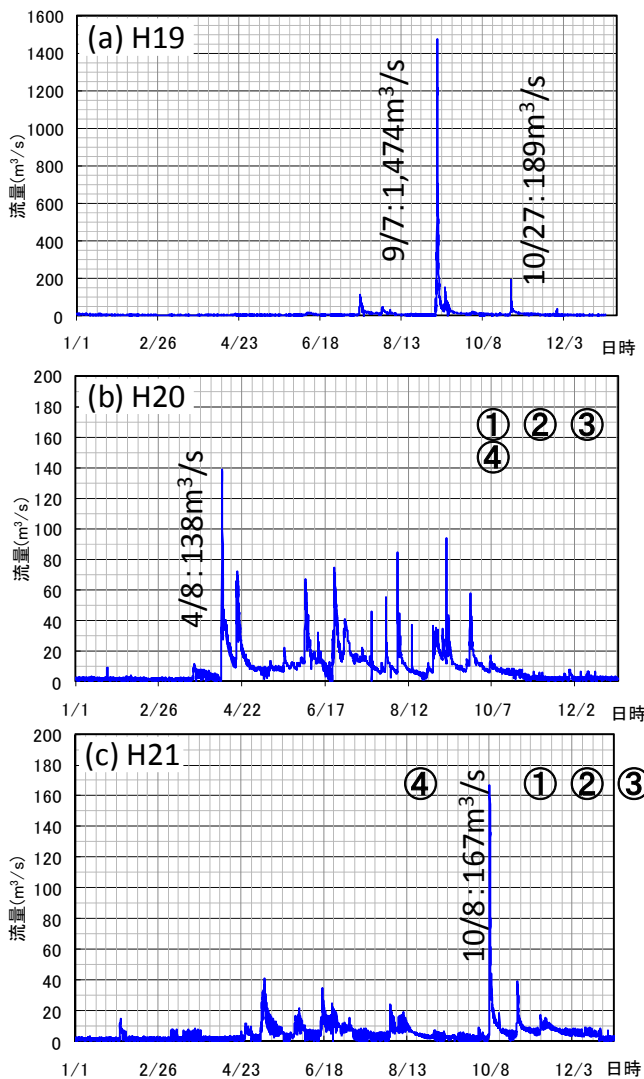


図-3.5 出水の発生状況

ら、測量に必要な GPS 衛星数を確保することが困難であった。そこで、基準となる端点のみ GPS で確認し、横断測線上の標高はトランシットなどにより測量を実施した。端点確認の際、地形条件等によっては RTK-GPS が全く使用できない場所もあり、VRS (Virtual

Reference Station) -GPS、Differential-GPS を併用した。

②瀬淵構造調査

水平精度 1m 程度の GPS 測量機を用いて、調査区間の瀬淵分布（平瀬、早瀬、淵の平面分布）を調べた。なお、合わせて河床の状態（浮石、沈み石、はまり石）、植生の繁茂状況および露岩状況を調査した。瀬淵構造および河床状態の判定としては平成 20 年度と同様に表-3.1、表-3.2 に従った。

③河床材料調査

平成 20 年度の調査地点とほぼ同一地点（1 km 間隔、水際付近）において、線格子法による河床材料調査を実施した。

④礫の移動状況調査

出水に伴う礫の移動状況を確認するため、水際に存在する河床材料に IC タグを埋め込み（以下、IC タグ付礫）、河床に敷設した。平成 20 年度は、7km 付近および 5km 付近に敷設したが、5 km 付近は人為的影響が大きかったため、平成 21 年度は 7 km 付近を中心に調査を実施した。また、上述したように IC タグの通信距離は短く IC タグのみでは調査が困難と考えられたため、低周波発信器を埋め込んだ礫（以下、発信器付礫）も合わせて設置した。設置箇所は後述する図-3.7 に示す。IC タグ付礫については、粒径 15cm~30cm を 54 個、粒径 30cm~50cm を 44 個、粒径 53cm、55cm、57cm、78cm、88cm、164cm をそれぞれ 1 個ずつ、合わせて 104 個をいずれも水際に敷設した。発信器付礫については、粒径 10cm 程度を 16 個、粒径 20cm 程度を 14 個、粒径 30cm、40cm、50cm 程度をそれぞれ 4 個ずつ、合わせて 42 個を敷設した。IC タグ付礫については、粒径の大きな礫はそのままの状態ですべて穿孔し IC タグを取り付け、小さい礫は取り付けた後に河床表面に単純に敷設したもので



ある(図-3.3 参照)。また、粒径 20cm 程度以下の発信器付礫は一度室内に持ち帰り発信器付礫を埋め込んだ後で、河床表面から見えなくなる程度に河床に埋め込んだ。粒径 30cm 程度以上の発信器付礫については現地で水面上に突出している礫を選び、現地で穿孔作業を実施した上で発信器を埋め込んだものである(図-3.4 参照)。発信器付礫については IC タグ付礫に比べ一部水中に没するような箇所には敷設した。

礫の移動状況調査に関連して、礫の移動限界を把握することを目的として、後述する図-3.7 に示すように礫設置区間近傍の 3 箇所に自記式水位計を設置した。記録は 15 分間隔とし、近傍には大気圧計も併設することで水位の大気圧補正も行った。

### 3.4 調査結果

調査結果を示すにあたり、調査を開始した平成19年から平成21年までの出水の発生状況を示す。ここでは、ダム諸量データベース<sup>3,4)</sup>からダムの流入量を抽出して図-3.5に示す。平成19年の出水は台風9号に伴い発生したもので、周辺地域では土砂災害、道路災害、河川災害など発生した。この時に生じた最大流入量は 1,480 m<sup>3</sup>/s (9月7日0時19分) であり、流入量の64.6%に相当する956 m<sup>3</sup>/sが調節された。ちなみに、下久保ダムの計画最大流入量は2,000 m<sup>3</sup>/sである。流量の増加に伴って土砂も同時に運搬され、下久保ダムの貯砂ダムには多量の土砂が堆積し、その後掘削・浚渫が行われた。平成20年、21年はそれぞれ最大で140m<sup>3</sup>/s、167m<sup>3</sup>/sの出水が発生したが、比較的小規模な出水であった。図-3.5には現地調査を実施した時期も合わせて示しており、以下に示す結果では平成21年10月出水前後での河道横断形状、瀬淵構造、河床材料の変化を確認する。また、礫の移動状況調査については、平成21年10月出水で移動した距離について示すものであり、図-3.5の④はマーカー付礫の設置日を表す。

#### ① 河川横断測量

図-3.6には、横断測量を行った 80 断面のうち、代表的な 4 断面の横断形を示す。なお、平成 20 年度は 50m 間隔で 161 断面の横断測量を実施したが、山間部での作業条件なども考慮し、平成 21 年度は 100m 間隔で 80 断面の横断測量とした。簡易 GPS で端点を決定せざるを得ない区間などもあり、測線が完全に一致していないなどの理由で地形が大きく変化したように見えた区間もあったが、図に示したように基本的には大きな地形変化は生じていない。

#### ② 瀬淵構造調査

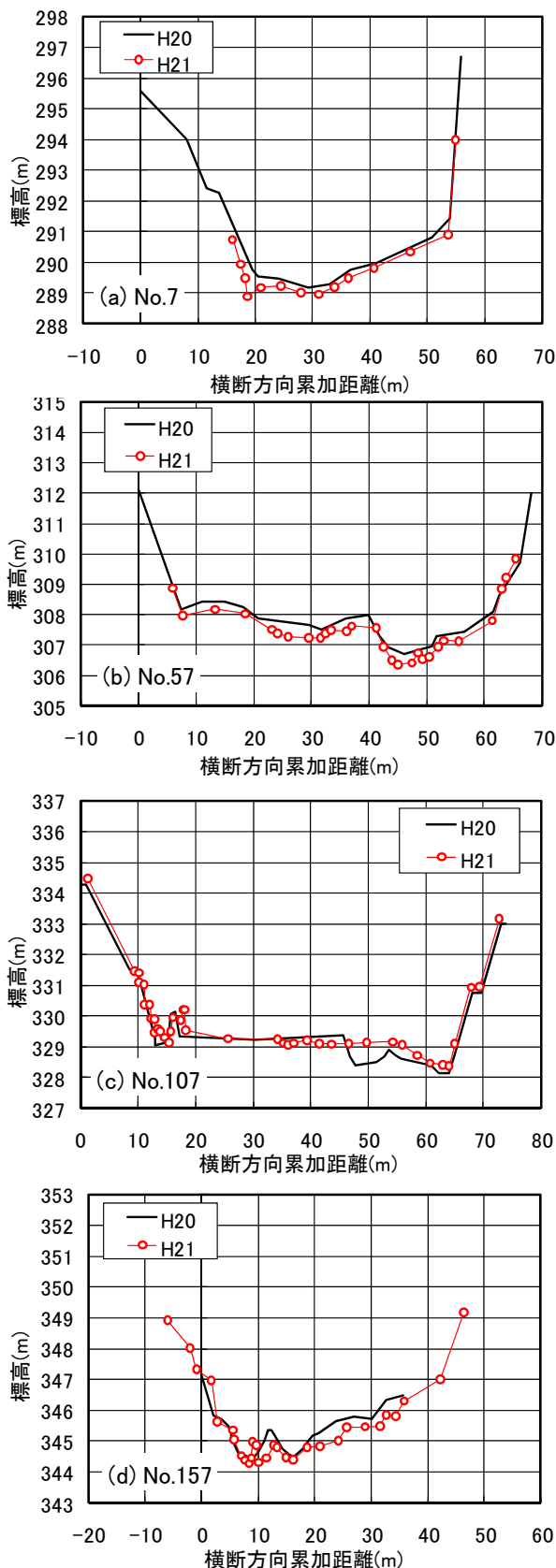


図-3.6 河道横断形の変化

図-3.7には、瀬淵構造調査結果を一例として、7 km 付近の調査結果を示す。7 km 付近には IC タグ付礫お

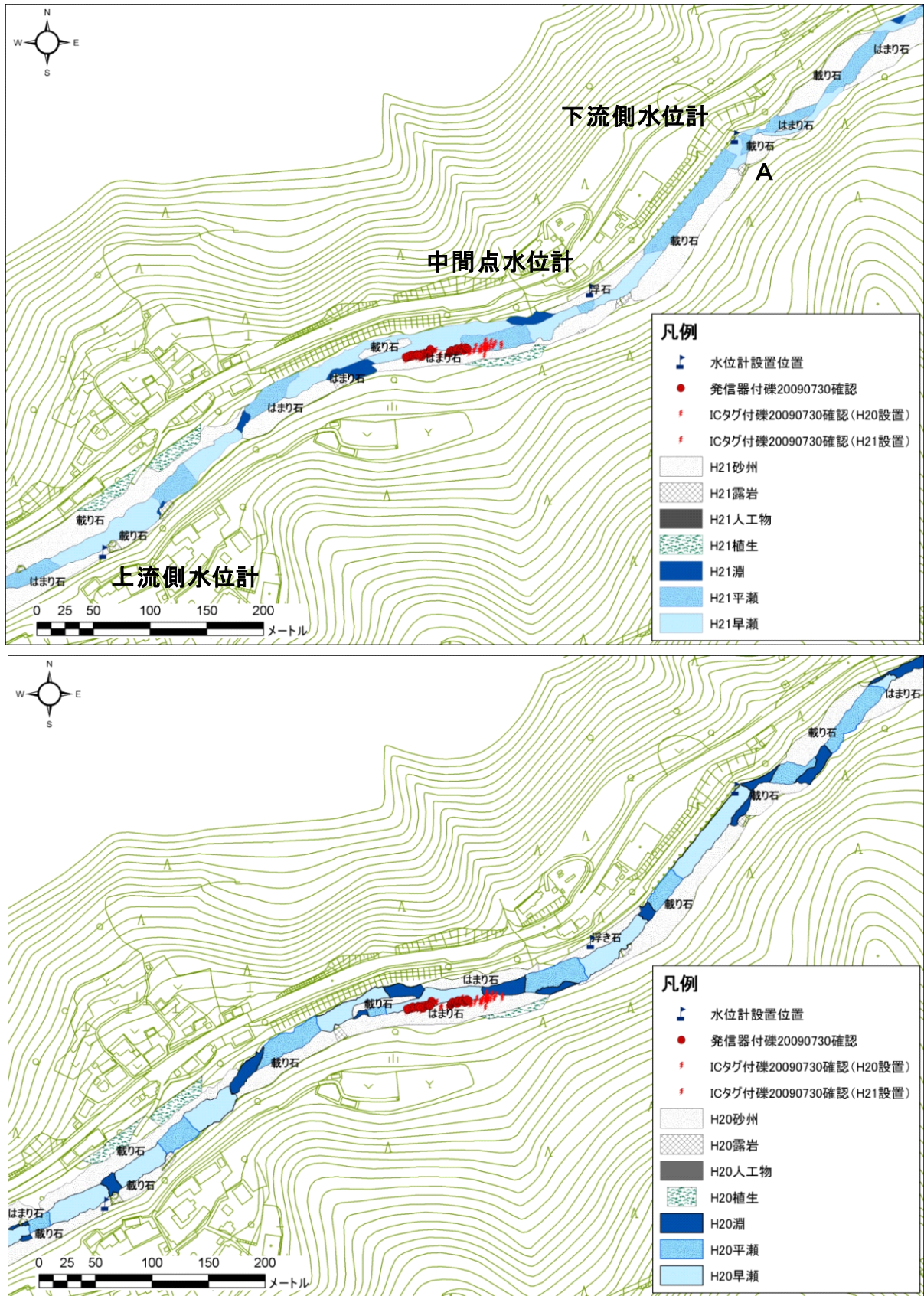


図-3.7 瀬淵構造の変化 (上段 : H21、下段 : H20)

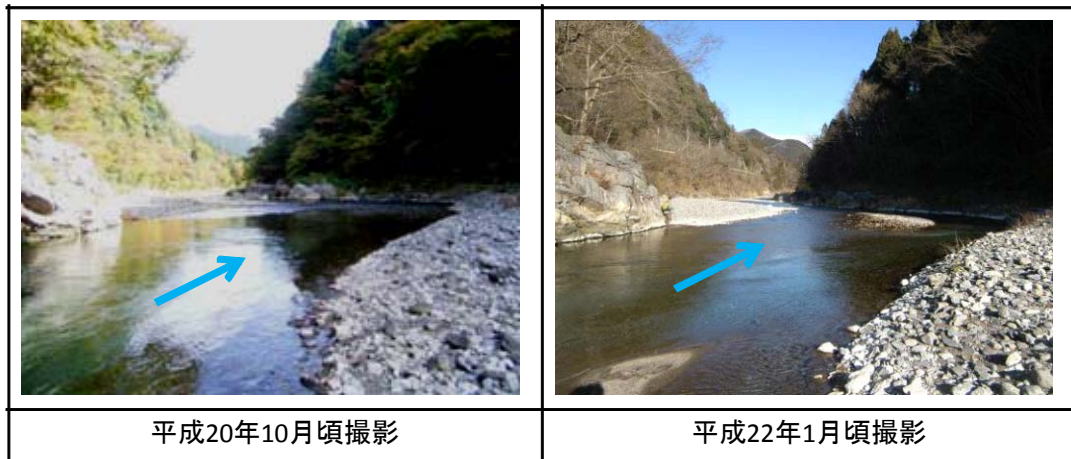


図-3.8 A地点から望む下流河道の変化

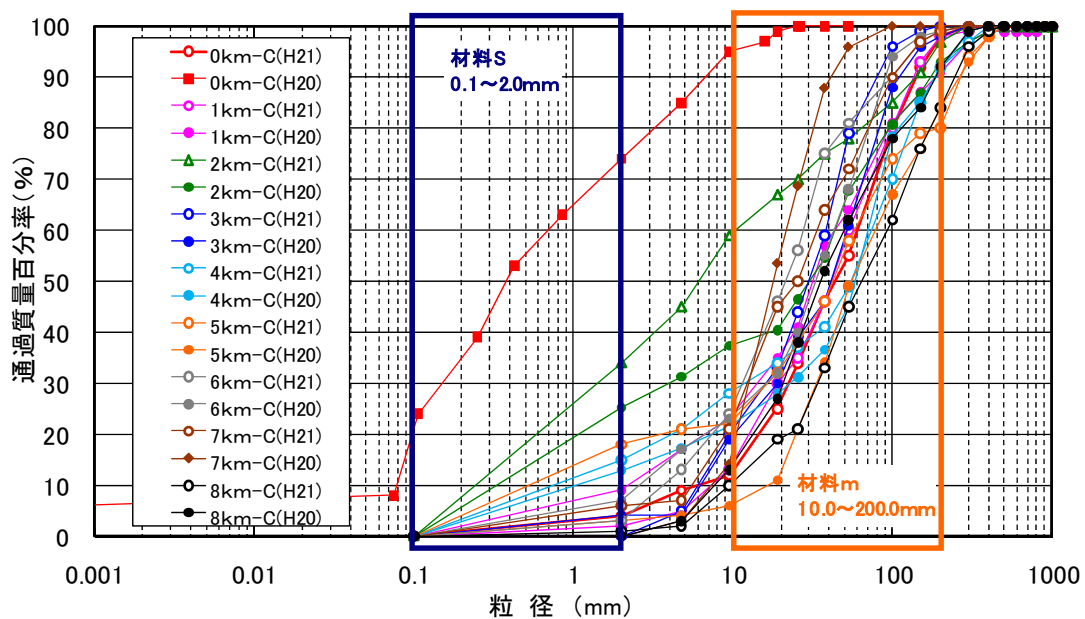
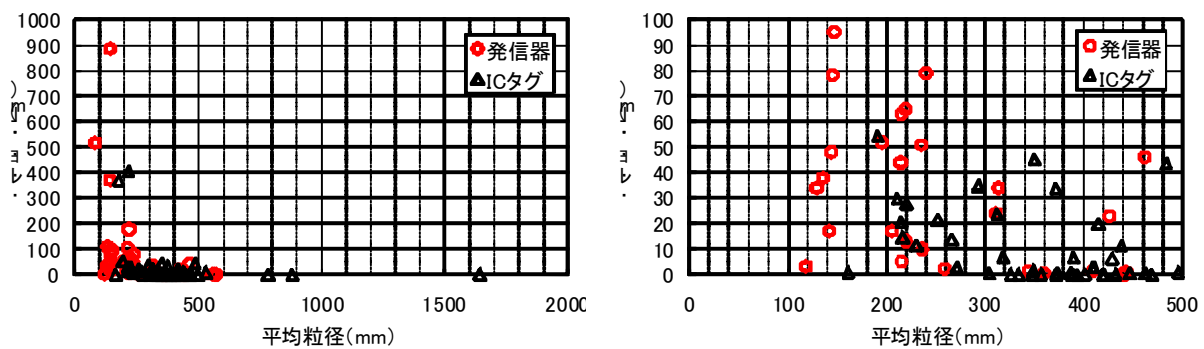


図-3.9 河床材料調査結果 (平成20年10月出水前後の変化)



(a) 移動が確認された全礫を対象

(b) 左図の一部を拡大

図-3.10 平成20年10月出水に伴う礫の移動距離と粒径の関係

よび発信器付礫を敷設しており、その位置も同時に示す。平成21年度の調査結果を見ると、淵の割合が減少するとともに平瀬の割合が増加している。これは、平

成19年9月出水で形成された瀬淵構造が小規模出水によって徐々に平滑化されてきている過程を捉えたものと考えている。恐らくある流量規模以上の出水が発生

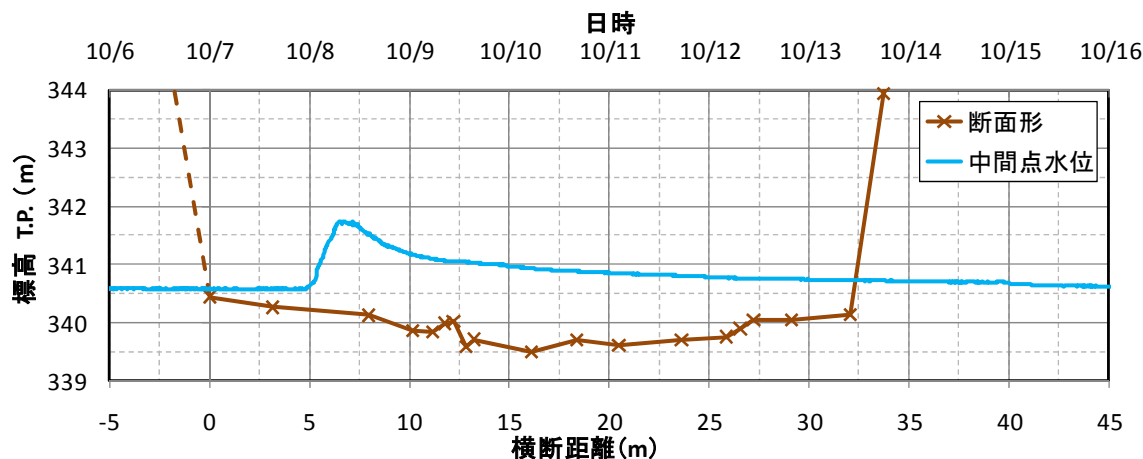


図-3.11 中間点水位計設置地点の河道断面形と平成20年10月出水時の水位変化

した場合には、水衝部となる箇所では淵が再形成され、瀬淵構造が明確化するものと推測された。この点については今後も調査を継続し、瀬淵構造の変化を記録することが重要であると考えられた。図-3.8には、図-3.7の地点Aから下流を望んだ景観である。平成20年10月頃には右岸側に淵が形成されていたが、平成22年1月頃には中州を確認でき、砂礫が堆積し淵が埋まった様子を確認できる。

#### ③河床材料調査

図-3.9は、平成21年度に実施した線格子法による河床材料調査結果を平成20年度の調査結果と比較したものである。ほとんどの場所では粒径10mm~200mmの材料mで構成されており、平成20年10月出水では河床材料の変化を確認できない。ただし、0km地点および7km地点では粗粒化が、2km地点では細粒化が生じている。これは、水際でも左右岸のどちらかで調査を実施しており、出水の規模によっては水衝部位置が変化し、水衝部となった場所では粗粒化が、逆に砂州が発達するような状況となった場所では細粒化が生じた結果であると考えられた。

#### ④礫の移動状況調査

平成21年10月出水によって7km付近では1.5m程度の水位上昇が見られ、その水位上昇に伴って礫が移動した。図-3.10には、移動前後の礫の距離を流路に沿って計測し、粒径との関係を整理した結果である。(a)図には出水後の調査で発見された全ての礫が掲載されており、(b)図は(a)図の一部を拡大したものである。同じ粒径でありながら、移動したものと移動していないものがあり、明確に移動限界を確認することはできないが、粒径20cm以下の材料は出水中の比較的長い時間で、粒径30cm~50cmの材料は流量ピーク時の短時間で移動していた可能性が高いことを理解できる。

なお、粒径50cm以上の礫については移動を確認することはできなかった。

図-3.11は中間点の断面形に、平成21年10月出水時の水位の変化を重ねて示したものである。今後、不定流計算によって各断面に発生した水理量を計算するために検証データとするものであるが、この計測結果から摩擦速度の概算値を算出すると、以下の通りとなる。出水ピーク時の水深1.8m、エネルギー勾配は平均的な河床勾配として1/140であるから、摩擦速度は35cm/s程度となり、岩垣の式を用いると粒径15cm程度の礫が移動することとなる。これは単一粒径の場合の移動可能性を単純に検討したものであるが、今後水量の計算と合わせて、混合粒径に対する移動限界との比較等検討を進める予定である。

## 4. 混合砂礫流送実験

### 4.1 目的

3章では、現地調査結果に基づいて、山地河道における河床材料の移動特性について検討した。山地河道の特徴としては、粒径分布が広いこと、巨礫が点在することが挙げられる。下久保ダム上流でも材料mは粒径10~200mmと幅のある粒度分布を持っており、河床には粒径200mm以上の巨礫、大きいものでは直径500mm以上の礫が点在している(写真-4.1)。しかしながら、これらの巨礫が土砂移動および河床形状に与える影響に関する知見は乏しい。そこで平成21年度は、実験水路を用いた室内試験により、巨礫のように通常の出水では移動しない河床材料が流砂量に与える影響を評価した。このように通常の出水では移動しない礫を「大きな石」と以下では呼ぶことにする。また水路



写真-4.1 点在する巨礫の状況（下久保ダム上流）

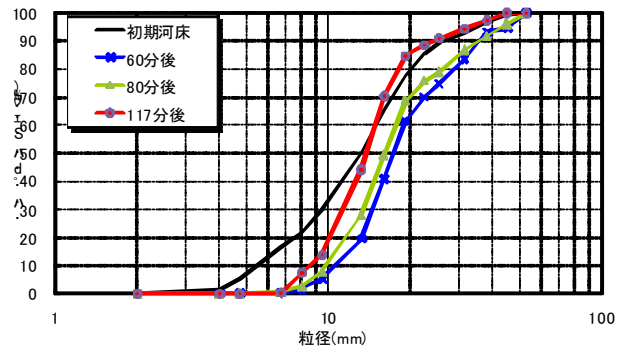


図-4.2 初期河床および流砂の粒度分布の変化

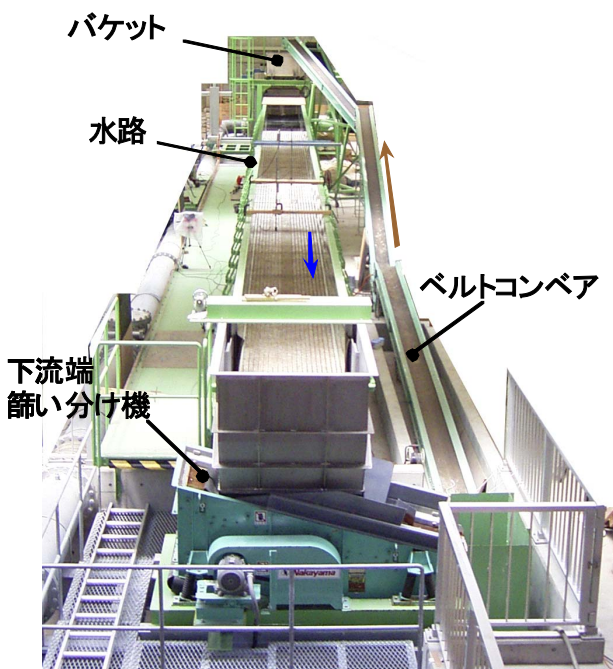


図-4.1 土砂循環装置付可変勾配水路

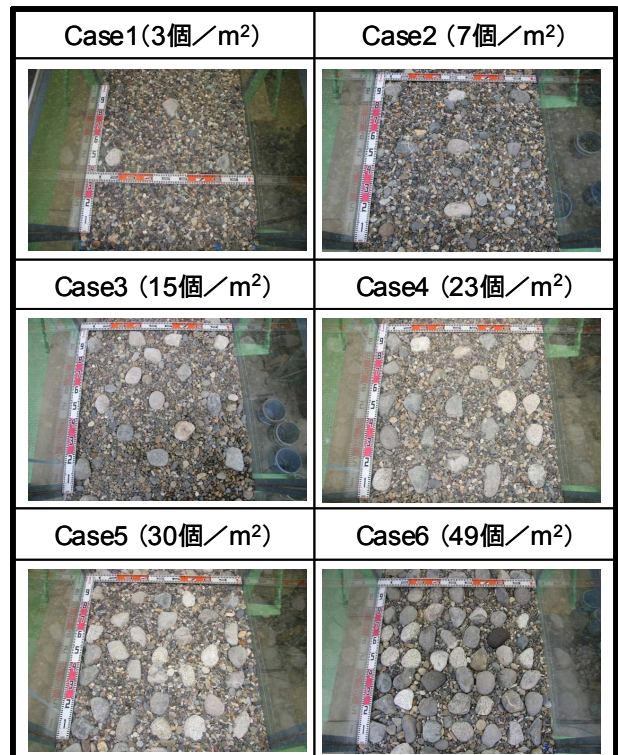


写真-4.2 大礫の敷設状況（括弧内は大礫の敷設数）

表-4.1 実験条件

Case	水路 勾配	流量 (m <sup>3</sup> /s)	河床材料		
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>84</sub> /D <sub>16</sub>	P <sub>LS</sub> (%)
Case0	1/100	0.18~0.52	15.0	3.3	0.0
Case1	1/100	0.2~0.52	20.1	3.4	2.3
Case2	1/100	0.2~0.52	22.5	3.7	5.2
Case3	1/100	0.2~0.52	27.0	4.9	10.7
Case4	1/100	0.2~0.52	31.2	6.7	15.9
Case5	1/100	0.2~0.52	34.6	12.0	20.1
Case6	1/100	0.2~0.52	43.0	11.7	30.2

実験では、移動しない河床材料として大礫を用いた。この大礫は粒径の分類基準<sup>4.1)</sup>に従うものであり、粒径64mm~256mmの礫の名称である。

#### 4.2 実験の概要

実験に用いた水路は、図-4.1に示す長さ30m、幅1m、深さ0.8mの土砂循環装置付可変勾配水路である。掃流砂は、水路下流端に設置された篩い分け機で浮遊砂と分離され、ベルトコンベアによって上流端のバケツまで運搬される。なお、ここでは浮遊砂は扱っていない。表-4.1に実験条件および河床材料の特性を示す。Case1~6の河床は、図-4.2に示すCase0の初期河床材料に直径約100mmの大礫を表にP<sub>LS</sub>で示す割合で敷設した場合の状態である（写真-4.2）。図-4.3

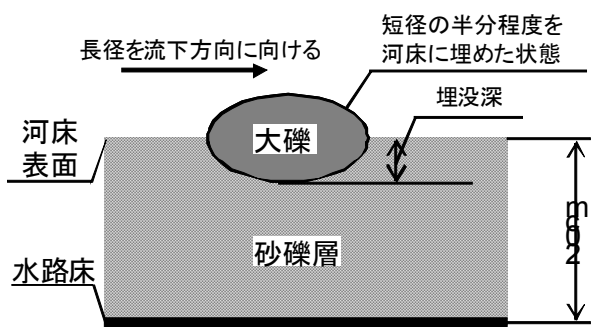


図-4.3 水路側面から見た大礫の敷設状況

に示すように、水路床に厚さ 20cm で図-4.2 の初期河床材料を敷き詰め、大礫の半分を河床に埋めた。その際、大礫の半分の重量に相当する初期河床材料を除去した。なお、通水前後で大礫の埋没状況は局所的な堆積、侵食は見られたが、全体としては大きく変化しなかった。粒度分布の算出にあたっては、河床材料を採取する層の厚さで粒度分布が異なる。ここでは、河床表面から突出した大礫を含め、大礫の粒径に相当する 100mm の深さまでの材料について粒度分布を算定した。なお、掃流力が最も大きくなる流量  $0.52\text{m}^3/\text{s}$ 、水路勾配 1/100 の条件でも、大礫がほとんど移動しないことを確認している。また、Case0 の河床材料の準備にあたっては、粒径 6.4mm、9.4mm、15mm、25mm、40mm のほぼ均一な材料を混合して製作した。

実験では、河床表面に占める大礫の割合を変化させ、主に①流砂量、②粒径ごとの粒子の移動速度、③移動層厚について、それぞれの変化を調べた。①の流砂量の計測にあたっては、ベルトコンベアの接続部に採取箱を設置し、一定量の流砂を採取する作業を 3 回実施し、それぞれの採取時間で割った採取量の平均値をもって流砂量とした。砂礫の流送現象においては、流砂量が時間的に変動することがあるので、それらの変動を考慮して、平均的な流砂量が得られるように 3 回の採取を行った。ちなみに、流量が  $0.52\text{m}^3/\text{s}$  時の 1 回の採取時間は 3~10 秒であった。また、流量を徐々に増加させ、河床材料の移動限界についても確認した。②の移動状況の把握においては、前述した 5 つの粒径ごとに 25 個の着色した河床材料を準備し、通水途中に No. 13 地点から投入した。ここで、No. 13 地点は水路の上流端から 13m に位置し、以下同様に表現する。その後、約 5 分間通水し、通水停止後に着色された河床材料を水路内で探索し、移動距離を計測するとともに、横断面内での位置、埋没状況を確認した。③の移動層厚調査では、②の着色礫の埋没状況も参考にし、河床に平均粒径 4mm の均一粒径の礫を円筒状（直径 5cm 程度、

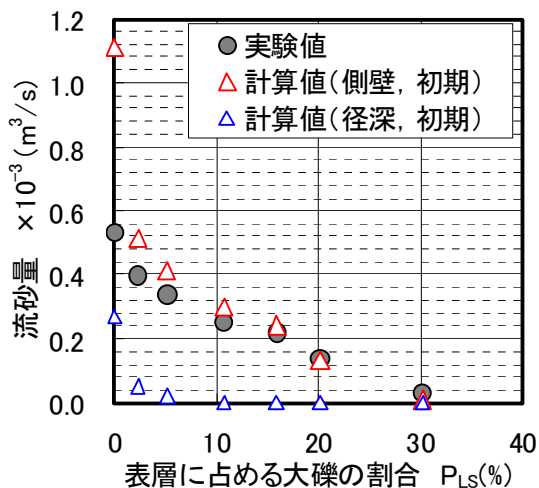


図-4.4 大礫の割合が流砂量に与える影響

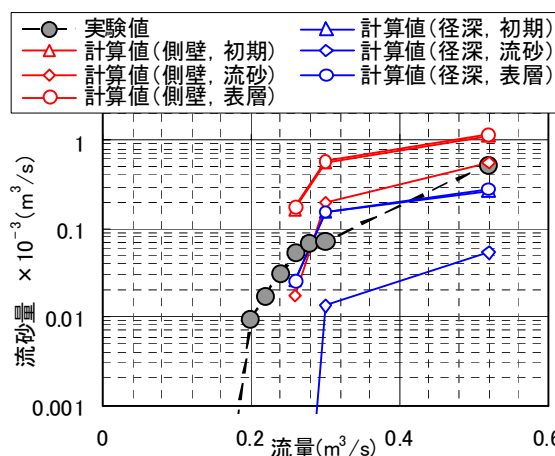


図-4.5 流砂量に関する実験値と計算値の比較

深さ 15cm 程度) に埋設し、置換された高さを計測することで移動層厚を計測した（以下、色砂置換法）。その際、横断方向に 5 点（左岸壁面から 5cm、25cm、50cm、75cm、95cm）、縦断方向の 3 点（No. 15 地点、No. 20 地点、No. 25 地点）で計測した。さらに、流砂および通水後の表層材料の粒度分布、水深、河床高を適宜計測した。

### 4.3 実験結果

#### ①大きな石の流砂量への影響

図-4.4 は、流量を  $0.52\text{m}^3/\text{s}$ 、水路勾配を 1/100 とし、連続通水し、定常状態となった後の流砂量をプロットした結果である。通水開始時には、時間の経過とともに減少傾向であった流砂量がある値で安定する。個々のケースで安定するまでの時間は異なるが、20 分から 90 分程度であった。その時に計測された流砂量を図示した。水路勾配、流量を固定したため、いずれのケースにおいても水深は 0.3m 程度、水面勾配は 1/100

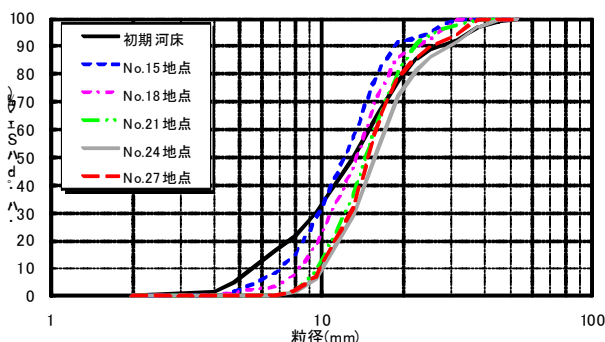


図-4.6 初期河床および通水後の河床の粒度分布の変化 (Case0)

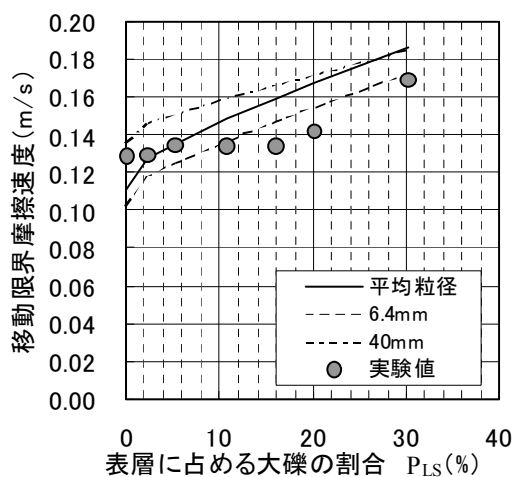


図-4.7 大礫の移動限界摩擦速度への影響

程度となり、摩擦速度は0.18m/s程度であった。なお、ここで示した流砂量は空隙を除いた値であり、以下同様の表記とする。

図-4.5は、Case0の粒度分布( $P_{LS}=0\%$ )について、流量の変化に伴う流砂量を計測した結果である。図中には、河床変動計算によく使われる芦田・道上による混合砂礫の掃流砂量式<sup>4.2)</sup>により算定した計算値を示した。ここで、移動限界掃流力の算定には後述するEgiazaroffの式を用いた。また、摩擦速度の算定にあたっては有効掃流力を考慮するとともに、計算に用いる径深として河積を潤辺で割って算出した径深(凡例では「径深」と表示)、側壁の粗度 $0.011s/m^{1/3}$ を考慮して算定した径深<sup>4.3)</sup>(凡例では「側壁」と表示)の2通りで計算している。また、河床材料の粒度分布として、初期河床、流砂および通水後の表層の粒度分布を使った結果をそれぞれ示した。水深およびエネルギー勾配は、流砂量計測時に計測した水深および水面勾配を使った。流砂および通水後の粒度分布は、それぞれ図-4.2の初期河床、図-4.6のNo.15地点の粒度分布を使用した。ここで、図-4.6は、通水後にNo.15～

No.27地点で、移動層厚の範囲で採取した河床材料の粒度分布である。また、流砂については、通水中の観察でも確認されているように、6.4mm、9.4mmの礫が河床間隙中に徐々に落下し、117分経過後には10mm以下の材料は半分以下になり、15mm程度の材料の割合が増加した。この流砂の粒度分布は通水後の河床の平均的な粒度分布と類似しており、計算では河床の平均的な粒度分布を用いるのが良いことを確認できる。

図-4.5によると、縦軸を対数表示していることもあり計算値が実験値をよく表現しているように見えるが、摩擦速度を算定するために用いる径深、採用する粒度分布によって、実験値に対して0.1～2倍と大きな変動幅を持つことを改めて確認できる。図-4.4には、河床材料として初期河床材料を用い、2通りの径深で算定した流砂量を示す。流砂量式に大きな石の影響を取り込むため、大きな石を一つの粒径階として粒度分布を与えた。ここで、粒度分布として流砂もしくは平均的な河床の粒度分布を与えるのが良いと考えられたが、流砂には大礫が含まれないこと、通水後に大礫を含めた材料調査を実施していないことから、初期河床の粒度分布を用いた。ガラス側壁を有する幅1m程度の水路に水深0.3mで通水していることから、側壁を考慮した結果が適切であると考えられ、 $P_{LS}$ の増加に伴う流砂量の変化をある程度評価している。大きな石を含む場合に、既往の流砂量式を適用する際の問題が指摘されることがあるが、表-4.1に示す粒度分布程度の範囲であれば、従来の式が適用可能であることを示す結果であった。

図-4.7は、観察結果から算出した移動限界摩擦速度をプロットした結果である。計算値は、粒度分布の違いを考慮して、芦田・道上<sup>4.2)</sup>による修正Egiazaroff式を用いて評価した結果である。観察結果によると、6.4mmの最小粒径が移動を開始すると同時に40mmの粒径も移動を開始することが確認されている。 $P_{LS}=0\%$ について見ると、計算上最大粒径が移動を開始する摩擦速度0.135m/s以下で実際に全ての粒径が移動を開始している。河床材料の初期の粒度分布を見ても $D_{84}/D_{16}$ が3.3と小さく、また図-4.2に示したように通水後はさらに均一化していたことから、Case0では均一砂と同様の挙動を示したと考えられる<sup>4.4)</sup>。一方、 $P_{LS}$ が徐々に大きくなり実験条件の範囲では移動しない材料が河床に存在すると、移動限界摩擦速度に変化が見られる。 $P_{LS}=0\sim 15.9\%$ では大礫の影響はほとんど見られないが、 $P_{LS}$ が20.1%以上になると徐々に移動限界摩擦速度が大きくなる。図-4.5でも見られるように、移

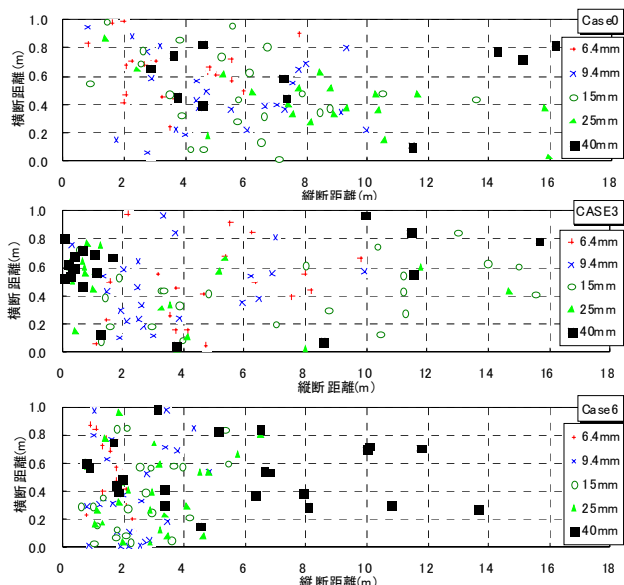


図-4.8 着色礫の移動後の分布状況

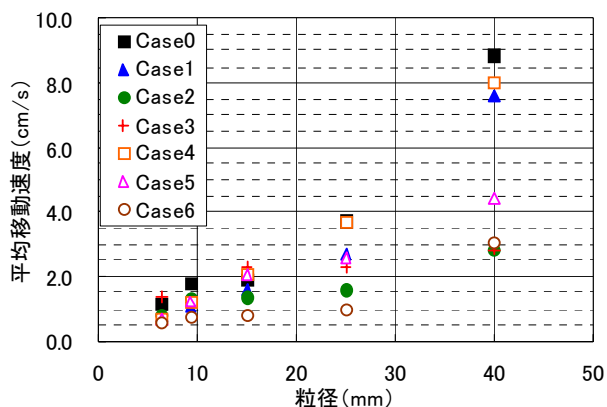


図-4.9 粒径ごとの平均移動速度

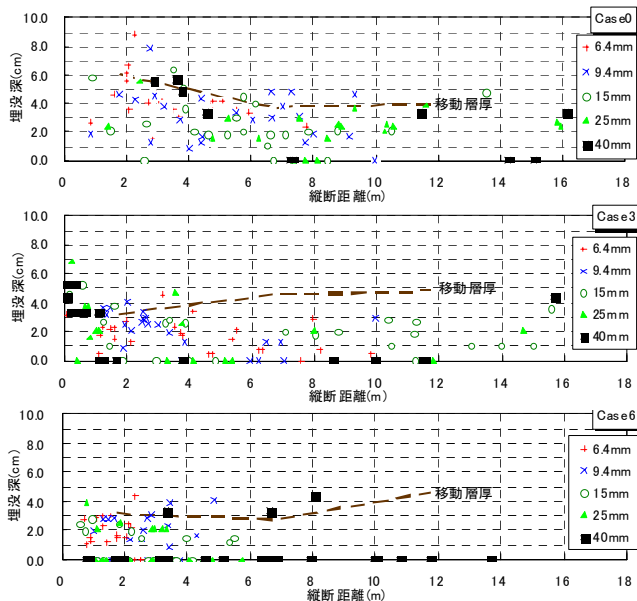


図-4.10 着色礫の埋没状況と移動層厚

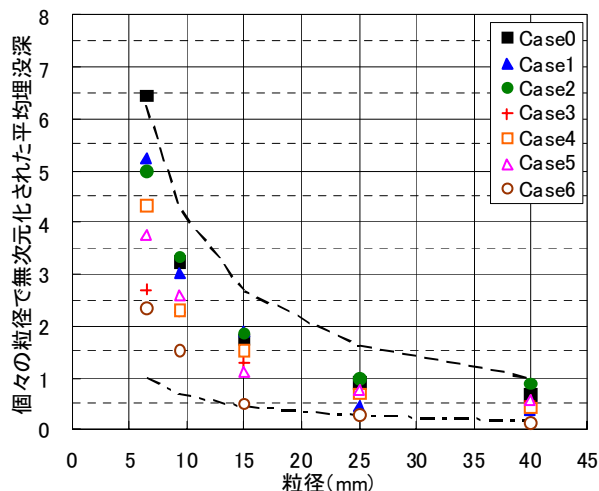


図-4.11 粒径ごとの平均的な埋没深

動限界付近での流砂量評価の信頼性を低下させている一つの原因と考えられる。

②大きな石の流砂の移動速度への影響

図-4.8 は、Case0、Case3 および Case6 について着色礫の移動状況を調査した結果を示す。実験条件としては、流量  $0.52\text{m}^3/\text{s}$ 、水路勾配  $1/100$  とした。縦断距離  $0\text{m}$  が、着色礫を投入した後で河床に着地したと推定される水路上流端から  $13.25\text{m}$  に相当する。図は投入後 5 分間の通水を継続した後の着色礫の平面分布を示す。データにばらつきが見られるが、 $P_{LS}$  の増加に伴って下流への移動量が減少していることを確認できる。図-4.9 は、全ケースについて上記のデータを整理し、個々の粒子の移動速度を算定後、粒径ごとに平均した移動速度を示す。図-4.8 の移動状況にばらつきが見られたように、 $P_{LS}$  が増加することで粒子の移動速度が低下することを一様に言及することはできないが、いくつかの例外を除くと、その傾向を指摘しても良さそうである。例外として顕著なのは、Case3 の粒径  $6.4\text{mm}$ 、Case4 の粒径  $15\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$ 、Case5 の粒径  $15\text{mm}$  の場合である。

③大きな石の移動層厚への影響

図-4.10 は、図-4.9 の結果について埋没深を示したものである。ここで、埋没深とは、通水後に着色した礫を探索し確認された位置について、河床表面から着色礫下端までの深さを示す (図-4.3 参照)。また、色砂置換法の調査結果について、中央 3 点での移動層厚の平均値を移動層厚として示した。壁面から  $5\text{cm}$  地点での調査結果は移動層厚が極端に小さく、壁面の影



響が大きいと考えられたため、ここでは除外した。

色砂置換法による調査からは顕著な傾向を確認できないが、着色礫の埋没状況からは、 $P_{LS}$ の増加に伴って、埋没深の浅い着色礫の数が増加している。図-4.11は、全ケースについて埋没深のデータを粒径ごとに平均した結果である。縦軸は、個々の粒径で無次元化された埋没深であり、1より小さい場合には河床表面に露出した状態で停止していたことが分かる。また、破線は移動可能な粒径の中での最大粒径 40mm に相当する移動層厚があったとした時の埋没深であり、最大粒径を各着色礫の粒径で割った値を示した。一点鎖線は最小粒径 6.4mm に相当する移動層厚であったとした時の埋没深であり、最小粒径を各着色礫の粒径で割った値を示した。いずれのデータも破線と一点鎖線の間にあり、例えば Case0 では交換層の議論でよく言われるように最大粒径程度の移動層厚があったことを確認できる。また、粒径 6.4mm で見ると、Case3 を除いて  $P_{LS}$  の増加に伴って、埋没深が減少する傾向を確認できる。

## 5. 平面2次元河床変動モデルの置土侵食現象予測への適用

### 5.1 検討の概要

近年、ダム下流の河川環境保全やダムの堆砂対策の観点から、ダム下流河道に貯水池内の堆積土砂を供給する試み（以下「置土」と称す）がなされている。置土はダム下流の河川管理者や利害関係者との調整がつけば、比較的安価で順応的に実施可能な土砂供給手法として期待されている。

下流河川の環境に配慮した置土による土砂供給を行うためには、土砂の侵食・流送挙動を体系的に把握するとともに適正な置土量や置土形状等を計画する手法が求められる。

そこで、置土の侵食過程と流送過程を予測するための数値計算手法について、開発を行っている平面2次元河床変動モデルを現地スケールの現象に適用して、再現性の検証を行った。H20年度は、三春ダム下流の置土を対象に検証を行ったが、H21年度は水理条件の異なる小渋ダム下流の置土を対として検証を実施した。

土木研究所が開発しているモデルについては、貯水池の堆砂現象、フラッシング等による排砂および下流への置土等による土砂供給において、河床変動を予測することを目的としている。その場合、横断方向の変化や側岸侵食等が関係する場合もあるため、平面2次

(連続式)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial z} = 0$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial UM}{\partial x} + \frac{\partial WM}{\partial z} = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu h \frac{\partial U}{\partial x} - \overline{uuu} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu h \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{uw} \right) - \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial UN}{\partial x} + \frac{\partial WN}{\partial z} = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu h \frac{\partial W}{\partial x} - \overline{uw} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu h \frac{\partial W}{\partial z} - \overline{www} \right) - \frac{\tau_{sz}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bz}}{\rho_0}$$

(粒径別浮遊砂輸送方程式)

$$\frac{\partial(\bar{C}_k h)}{\partial t} + \frac{\partial(U\bar{C}_k h)}{\partial x} + \frac{\partial(W\bar{C}_k h)}{\partial z} = q_{upk} - q_{downk} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_k h \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_k h \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial(\bar{C}_k h)}{\partial t} + \frac{\partial(M\bar{C}_k)}{\partial x} + \frac{\partial(N\bar{C}_k)}{\partial z} = q_{upk} - q_{downk} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_k h \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_k h \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial z} \right)$$

(流砂の連続式)

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ (1-\lambda) y_b \} + \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bz}}{\partial z} = q_{down} - q_{up}$$

$$q_{Bx} = \sum_k q_{Bxk}, \quad q_{Bz} = \sum_k q_{Bzk}, \quad q_{up} = \sum_k q_{upk}, \quad q_{down} = \sum_k q_{downk}$$

(交換層内における粒径別土砂収支式)

河床上昇時

$$\frac{\partial(P_{sk} y_{sa})}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial q_{Bxk}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bzk}}{\partial z} + q_{upk} - q_{downk} \right\} = -P_{sk} \left( \frac{\partial y_{sb}}{\partial t} \right)$$

河床低下時

$$\frac{\partial(P_{sk} y_{sa})}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial q_{Bxk}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bzk}}{\partial z} + q_{upk} - q_{downk} \right\} = -P_{ok} \left( \frac{\partial y_{sb}}{\partial t} \right)$$

ここに、

$(x, y, z)$ : 空間座標( $x$ : 流下方向,  $y$ : 鉛直上向き方向,  $z$ : 横断方向),  $h$ : 水深,  $y_b$ : 河床の  $y$  座標,  $t$ : 時間,  $(M, N)$ :  $x$  方向,  $z$  方向のフラックス( $M=Uh, N=Wh$ ),

$(U, W)$ : 水深方向に平均した平均流速ベクトル,  $\overline{uu}, \overline{uw}, \overline{ww}$ :  $\overline{u'u'}, \overline{u'w'}$ ,  $\overline{w'w'}$  の水深方向の平均値,  $(u', v', w')$ : 乱れ速度ベクトル,  $g$ : 重力加速度,

$\nu$ : 動粘性係数,  $\rho$ : 流体の密度,  $\rho_0$ : 流体の基準密度,  $\tau_{sx}, \tau_{bx}, \tau_{sz}, \tau_{bz}$ : 水面及び河床面に単位面積当たり作用する力の  $x, z$  方向成分,  $(q_{Bx}, q_{Bz})$ :  $x$  方向,  $z$  方向の単位幅当たり掃流砂量( $m^2/s$ ),  $\lambda$ : 河床の間隙率(空隙率),  $\bar{C}_k$ : 粒径別断面平均浮遊砂濃度( $m^3/m^3$ ),  $D_k$ : 水平方向の拡散係数(渦動粘性係数),  $q_{up}$ : 単位面積当たり浮遊砂浮上フラックス( $m/s$ ),  $q_{down}$ : 単位面積当たり浮遊砂沈降フラックス( $m/s$ ),  $(q_{Bxk}, q_{Bzk})$ :  $x$  方向,  $z$  方向の粒径別単位幅掃流砂量,

図-5.1 平面2次元河床変動モデルの基礎

元河床変動モデルを採用している。これまでに、水中安息角を用いた側岸侵食を組み込んだ混合粒径の掃流砂及び浮遊砂を取り扱うモデルを開発してきている<sup>5.1)</sup>。

### 5.2 数値計算モデルの概要

平面2次元の流れと河床変動の基礎式を図-5.1に示す。基礎式は、水深方向に積分された連続式、水平方向(2方向)の運動方程式、浮遊砂の輸送方程式、河床の交換層内の粒径別土砂収支式および流砂の連続式から構成される。

水面に作用する応力は0と仮定し、河床面に作用する応力はManning則を用いて算定する。

水深平均したレイノルズ応力は、速度勾配と水平方

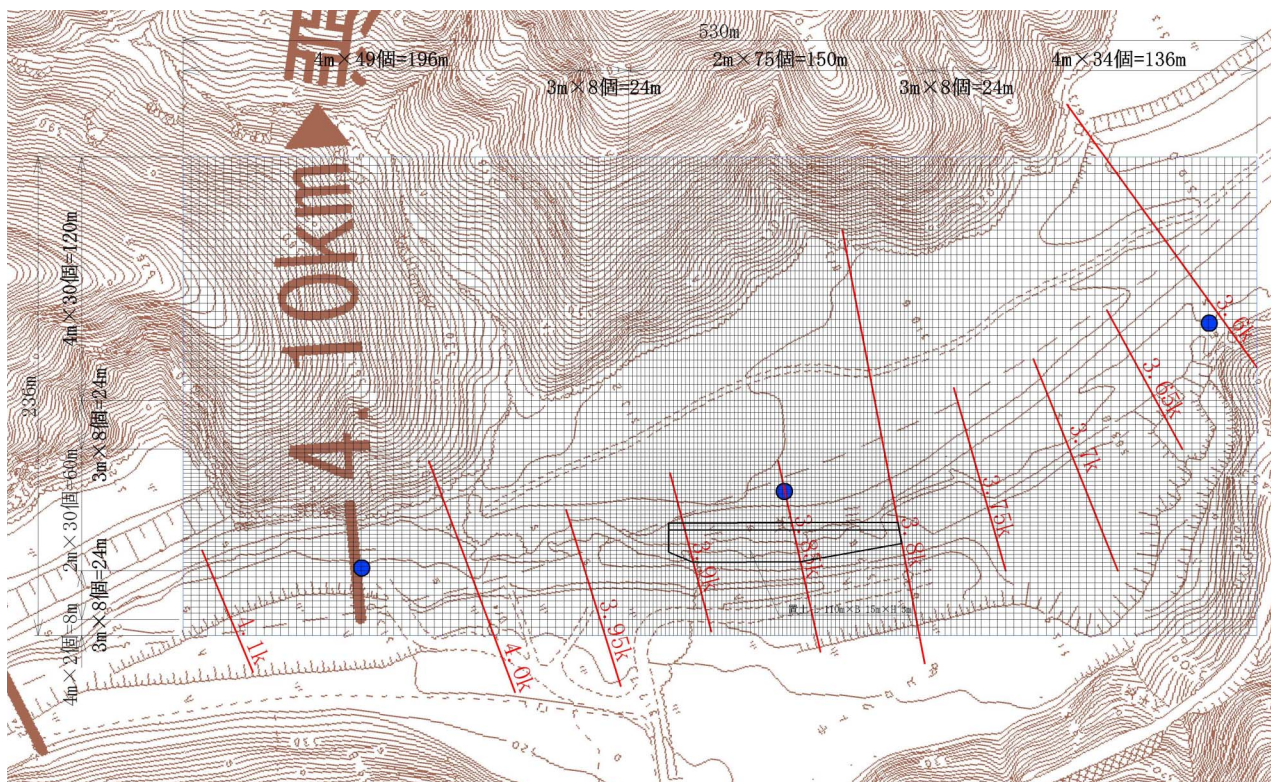


図-5.2 小渋ダム下流河道の計算領域及び計算格子（赤線：測量断面位置、丸印：水位計測位置）

向の渦動粘性係数、水深平均の乱れエネルギーを用いてモデル化する。

混合粒径の主流方向の掃流砂量の算定には、芦田・道上の流砂量式を用いることとした。混合粒径掃流砂の計算で必要となる粒径別限界摩擦力については、Egiazaroff によって提案された式を芦田・道上が一部修正した修正 Egiazaroff 式を用いる。その際に必要となる平均粒径の無次元限界掃流力は岩垣による実験式から求める。主流に直交する方向の掃流砂量については、長谷川の式から二次流の影響を無視した式を用いる。

浮遊砂の沈降フラックスについては、底面濃度と沈降速度の積によって求める。底面濃度については、浮遊砂の移流拡散方程式に定常状態及び水平方向移流成分を無視することを仮定して、水深方向の濃度分布関数を求め、平均濃度から算定する。

浮遊砂の浮上フラックスについては、基準面濃度と沈降速度の積によって求める。基準面濃度については、従来多くの式が提案されているが、ここでは掃流砂と同様に芦田・道上の濃度式を用いた。

沈降速度の算定には、Rubey の実験式を用いた。また、浮遊砂が存在するかどうかの判定は、摩擦速度が沈降速度より大きい場合に存在するものとした。

用いた式と数値解析法、側岸侵食モデルについての

詳細は、H20 年度の報告書<sup>5.2)</sup>を参照されたい。

### 5.3 数値計算モデルの実現象への適用

#### 5.3.1 対象とする現象

検証の対象としたのは、長野県下伊那郡の一級河川天竜川の支川小渋川に昭和 44 年に竣工した小渋ダムの下流河川である。小渋ダムでは有効貯水容量の減少に対処するとともに土砂の連続性を確保するため、土砂バイパストンネルの設置等の事業が計画・実施されている。近年、施設完成後の影響を把握するために、試験的にダム下流河川への置土が実施されている。

計算の対象とした観測データは、2009 年に実施された置土について、2009 年 6 月～7 月にかけての置土侵食状況を調査した結果であり、詳細は、「14.5 貯水池下流供給土砂の高精度制御に関する研究」の報告を参照されたい。

#### 5.3.2 計算条件

計算は、粒径を単一粒径とした場合と、混合粒径とした場合の 2 条件について行った。単一粒径の場合には、前述のモデルのうち掃流砂のみを考慮しており、混合粒径の場合は、掃流砂と浮遊砂の両者を考慮した。計算条件の詳細を以降に示す。

##### (1) 計算格子

図-5.2 に計算領域と計算格子を示す。図中の赤線

は横断測量を行った断面位置であり、青い丸印は水位計を設置した位置を示している。計算領域は置土周辺の河道形状を考慮して、流下方向に530m、横断方向に236mの長方形の領域とした。計算格子は流下方向に174個、横断方向に78個(236m)を設定した。なお、格子の大きさは2m、3m、4mの3種類を組み合わせしており、置土周辺の格子サイズを小さくした。

(2) 代表粒径

単一粒径の場合には、置土から採取した土砂を分析して得た平均の粒度分布を参考に、掃流砂のみを考慮していることから、ふるい目0.25mm以下の土砂をカットした後求めた平均粒径から6mmとした。

混合粒径の場合には、粒度を分割し、代表粒径を設定しており、その分割状況を図-5.3に、代表粒径と支配割合表-5.1に示す。

(3) 上流端及び下流端の計算条件

境界条件としては、上流端に流量、下流端に水位の時系列の条件を与えた。図-5.4に小渋ダム放流量とそれを上流端計算条件用に短縮したハイドログラフを示す。図-5.5に3.6k地点の水位時系列とそれを下流端計算条件用に短縮した水位時系列を示す。

なお、上流端からの流入土砂量は無いものとした。

(4) その他の計算パラメータ

表-5.2にその他の計算パラメータを示す。間隙率については、置土材料を分析して得られた値0.325を用いた。

(5) 初期河床高

図-5.6に固定床の等高線図と初期河床堆積厚さの濃淡図を示す。置土以外の河床材料は比較的大きい礫で構成されており、今回の出水でほとんど移動していないと考えられるため、初期条件としては、固定床とした。従って、初期条件として、置土の設置領域のみに、河床材料を設置した。

(6) 助走計算

計算を行うために、初期条件の流速と水位を与える必要があるが、これは助走計算を行うことでデータを作成した。助走計算については詳細に述べられることは少ないが、ノウハウが必要な場合もあるため、今後のモデルの普及等を考慮して、以下に概要を記述する。

助走計算では、はじめに、初期条件として、上流端から下流端までが水没するEL.513mの水位と流速0m/sの条件を全領域に与えた。計算時間間隔を0.1secとして、流量を目標流量(維持流量0.72m<sup>3</sup>/s)まで増加させた後に、下流端水位を20時間かけて目標水位(計算対象期間の最初の下流端水位:EL.505.62m)まで低下

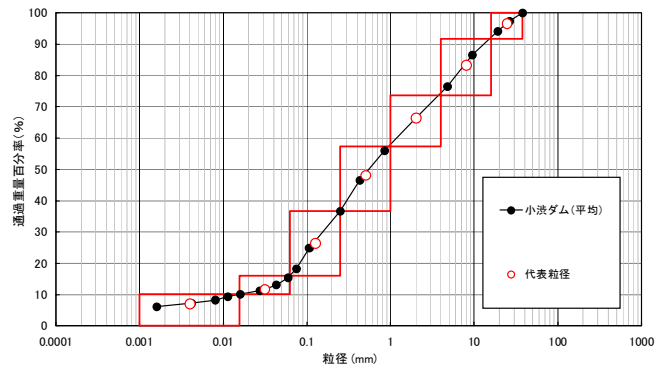


図-5.3 置土材料の粒度分割

表-5.1 置土材料の代表粒径と構成割合

粒径番号	粒度分割の下限粒径 (mm)	粒度分割の上限粒径 (mm)	代表粒径 (mm)	構成割合 (%)
代表粒径1	16.000	37.500	24.495	8.2
代表粒径2	4.000	16.000	8.000	18.0
代表粒径3	1.000	4.000	2.000	16.4
代表粒径4	0.250	1.000	0.500	20.6
代表粒径5	0.063	0.250	0.125	20.7
代表粒径6	0.016	0.063	0.031	5.9
代表粒径7	0.001	0.016	0.004	10.1

表-5.2 計算のパラメータ

パラメータの名称	単位	値
流下方向格子数	-	174
横断方向格子数	-	78
流動計算に使う水の密度	kg/m <sup>3</sup>	1,000
土粒子密度	kg/m <sup>3</sup>	2,650
動粘性係数	m <sup>2</sup> /s	0.000001
間隙率(空隙率)	-	0.325
河床材料の静止摩擦係数	-	0.9
河床材料の動摩擦係数	-	0.4
側岸侵食の崩壊の判定を行う時間間隔	sec	60
土砂の水中安息角	度	30
河床の粒度分布を記憶する層の厚さ(混合粒径のみ)	m	0.10
交換層厚(混合粒径のみ)	m	0.03
計算時間間隔	sec	0.1

する計算を行った。しかし、水位低下の途中で水面が震動し、計算が発散した。

そこで、流量をある程度増加させてから水位を下げたり、水位低下と水位維持を繰り返しながら目標水位まで低下させたり、計算時間間隔を小さくする等の試行錯誤を行った。

最終的には、初期水位をEL.513mとして、下流端水位を維持したまま1時間かけて流量を60m<sup>3</sup>/sまで増加させ、その後、流量を維持したまま9時間かけて下流端水位を目標水位まで低下させ、最後に下流端水位を維持したまま3時間かけて流量を目標流量まで減少させることで、計算対象期間の初期の水位と流速の分布データを作成した。なお、この間、土砂移動の計算

14.4 貯水池および貯水池下流の流れと土砂移動モデルに関する研究

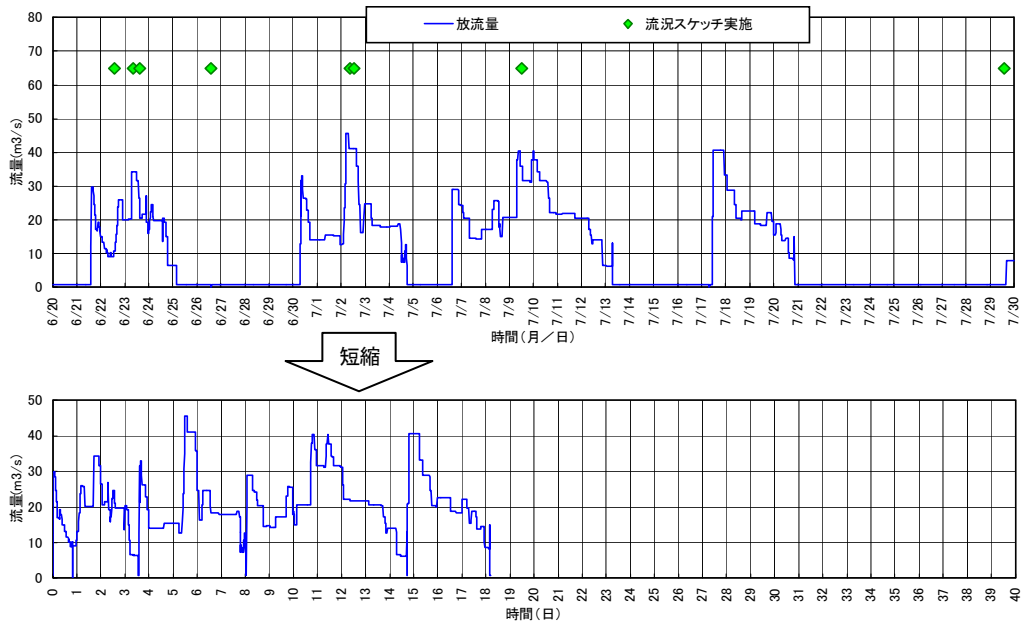


図-5.4 小渋ダム放流量（上：観測値、下：計算用上流端入力流量）

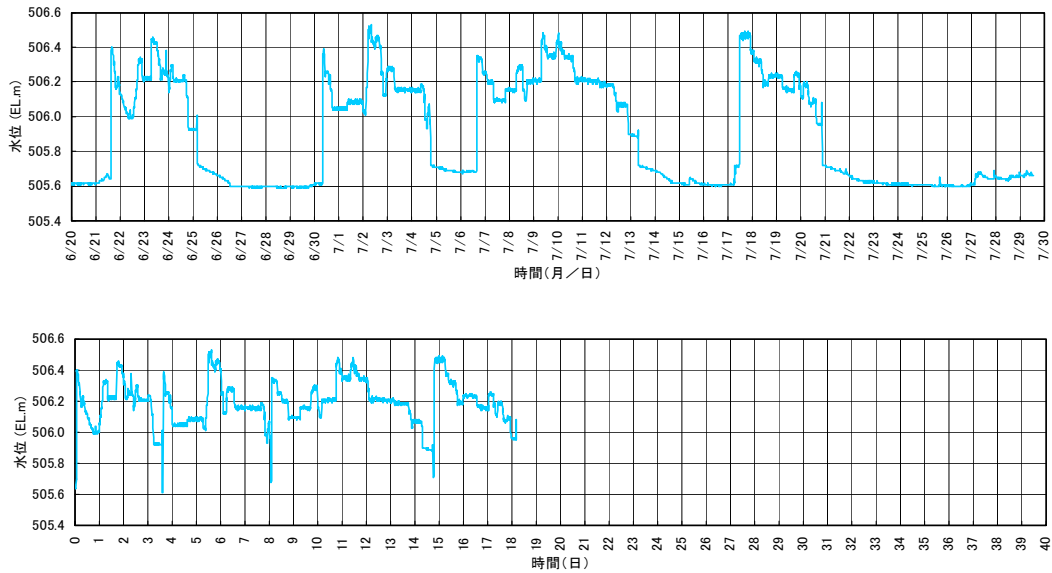


図-5.5 3.6k 地点水位（上：観測値、下：計算用下流端入力水位）

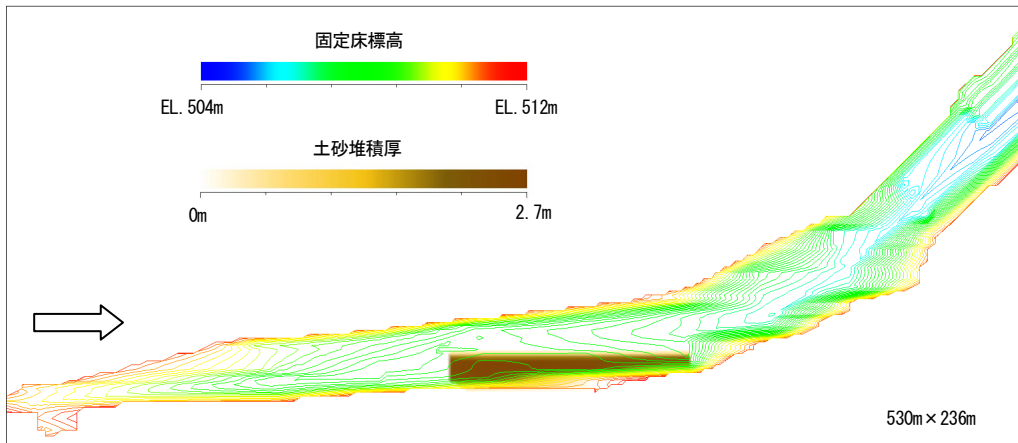


図-5.6 固定床地形及び初期土砂堆積厚

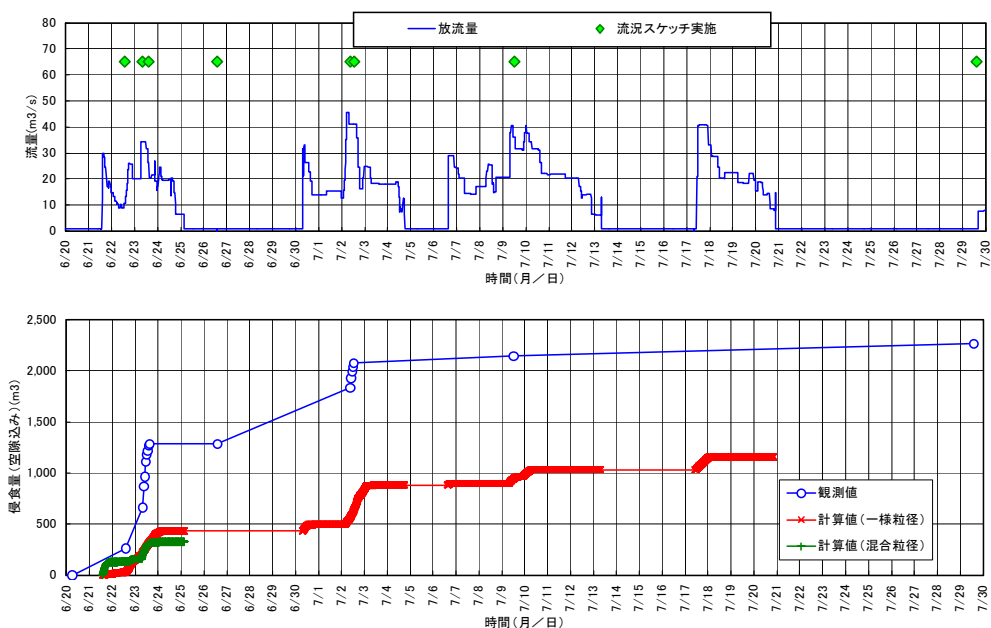


図-5.7 置土侵食量の時間変化

は行っていない。

今回の地形条件では、はじめにある程度流量を大きくすることで、水位低下時の水面震動を押し返すことができた。

### 5.3.3 計算結果

図-5.7 に置土の侵食量の時間変化を観測地と合わせて示す。図-5.8 には、一様粒径と混合粒径の1回目の出水が終わった後の置土の侵食形状と4回の出水後の一様粒径の侵食形状を観測のスケッチと比較して示す。

図-5.7 より、一様粒径の計算結果は、1回目と2回目の出水で多くの土砂が侵食し、3回目、4回目の出水では侵食量が少ないという観測結果の傾向を再現しているものの、定量的には侵食量が半分程度でかなり小さい。混合粒径の計算については、1回目の出水の初期には一様粒径の計算よりも侵食量が多いが、ピーク時付近では一様粒径の計算よりも侵食量が少なくなっている。図-5.8 の侵食形状をみても、計算結果は置土の先端から40m程度までの部分では、観測値とよく一致しているが、それより下流では、計算における側岸侵食量が少なく、この部分が侵食量の不足の原因となっている。

今後は、この他の水理量等についても検討を行い、入力データ及びパラメータの修正やモデルの改良を行って再現性を向上させていきたい。

## 6. まとめ

微細粒子土砂の沈降について、以下の通りまとめる。

- 1) 沈降筒法は沈降現象を把握するには最も適した方法と考えられる。恒温室内の気温を適切に管理することにより、 $\phi 200\text{mm}$ 、 $H=2.0\text{m}$  の沈降筒を用いて、信頼性のあるデータが得られる。
- 2) 沈降筒法の代替法としては、遠心沈降法が有用である。川治ダムの底泥を採取し模擬濁水を試料として分析する場合には、分散処理が必要である。
- 3) 川治ダム流入濁水、下久保ダム流入濁水の粒子形状を観察したところ、主に鱗片状の厚みのある粒子で構成されていた。粒子形状が扁平であることから、レーザー回折法の結果を用いて沈降速度を設定すると、実際よりも過大となると考えられる。

小規模出水に伴う山地河道の変化として、以下のことを確認した。

- 4) 山地河道は比較的大粒径の礫によって河道の形状が決まっており、小規模出水によってはその形状はほとんど変化しないと考えられた。
- 5) しかしながら、淵などが埋まる、砂州上に砂が堆積し礫面を覆う、またはその逆に砂州上に堆積した砂が流送され礫面が露出するなどの微地形の変化は生じることが確認された。
- 6) 山地河道では小規模出水においても比較的大きな掃流力が発生し、粒径10cmから20cm程度の礫は容易に移動することが確認された。

今後は、中規模以上の出水を対象とした調査に焦点を当てる予定である。

14.4 貯水池および貯水池下流の流れと土砂移動モデルに関する研究

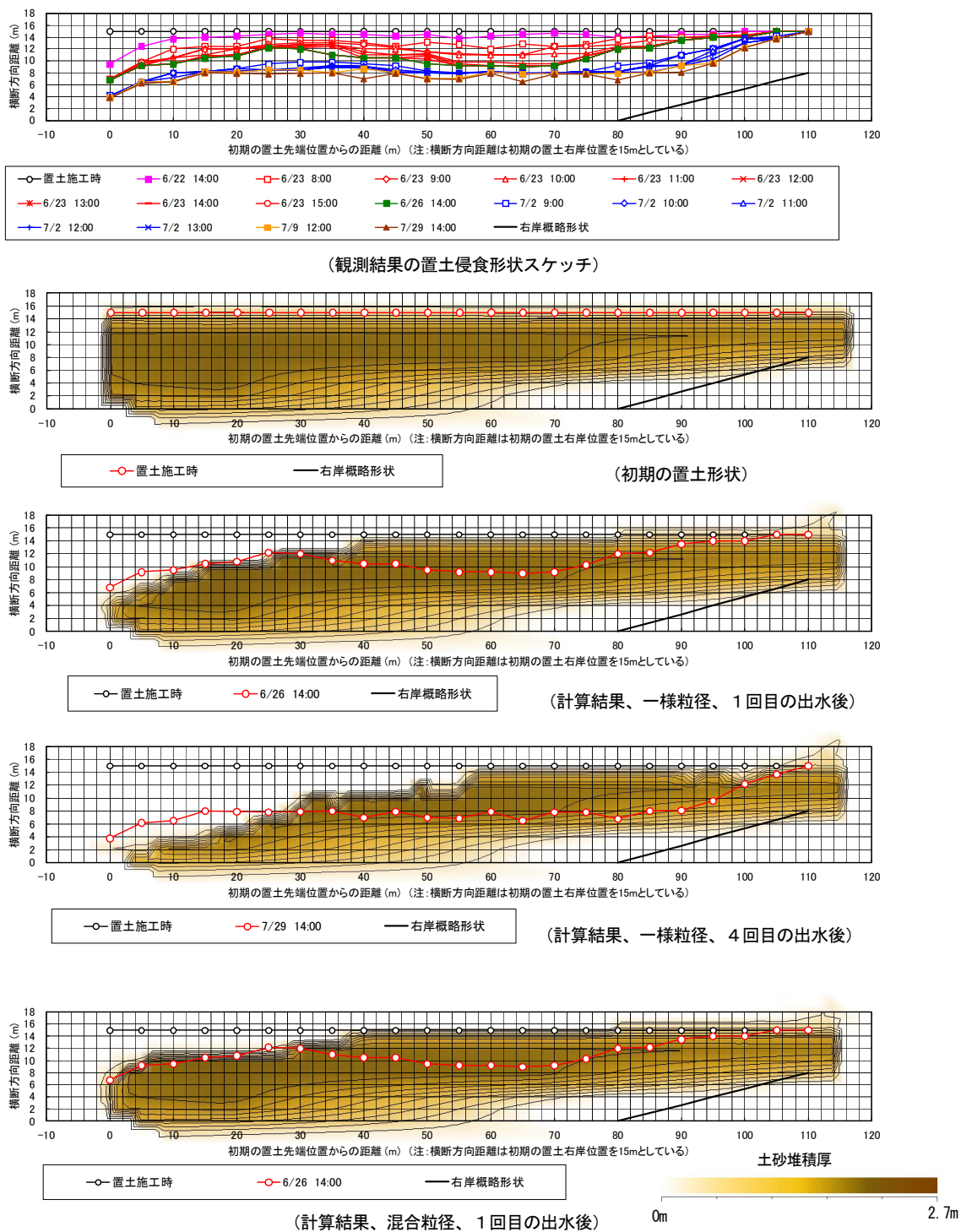


図-5.8 置土侵食平面形状

7) 大きな石の流砂への影響について実験的な検討を行った結果、大きな石をわずかに 2.3%の重量百分率の割合で河床に敷設することで流砂量を 25%程度低減させる効果があることが確認された。解析的な観点からすると、議論の余地が多々残されることを認識しているが、ダム近傍における河床変動を予測する必要性が高まる中で、本実験結果は既存の流砂量式

の改良、もしくは新たな流砂量式の提案に向けて貴重な情報と与えるものとする。さらに、礫床河道の河床材料調査法に関連しても重要な示唆を与えている。広い粒度分布、点在する巨礫などの特徴のため、山地河道では河床材料調査の困難さが指摘されることがある。このような調査の困難さがある一方、点在する大きな石の流砂量への影響が大きいことか

ら、山地河道では沖積河道に比べ、より精度の高い河床材料調査法が求められることを理解すべきである。

置土の侵食過程と流送過程を予測するための数値計算手法について、小渋ダム下流の置土侵食の観測結果を対象にモデルを適用した。その結果得られた知見を以下に示す。

- 8) 一様粒径の計算によって、4回の出水による侵食の傾向を再現することができた。
- 9) 一様粒径の計算及び混合粒径の計算はともに、侵食量をかなり過小に予測する結果となった。これは置土中流及び下流の側岸侵食現象の再現性に課題があることが原因である。

今後は、この他の水量等についても検討を行い、入力データ及びパラメータの修正やモデルの改良を行って再現性を向上させていきたい。

## 謝辞

万場観測局のデータについては、(独)水資源機構下久保ダム管理所から提供していただいた。また、瀬淵構造調査結果を示した背景図は、国土交通省関東地方整備局利根川砂防工事事務所から DM データを提供していただいた。ここに記して、謝意を表します。

混合砂礫流送実験の実験水路は国土交通省国土技術政策総合研究所の所有する土砂循環装置付可変勾配水路を使用した。ここに記して、謝意を表します。

小渋ダムの置土観測データの一部については、国土交通省中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所から提供していただいた。ここに記して、謝意を表します。

## 参考文献

- 3.1) ダム環境プロジェクト(第3分科会):ダムと下流河道の物理環境及び生物との関係についての捉え方、平成20年2月版。
- 3.2) 岡部健士・肥本一郎:大径礫を伴う山地河床における流砂の有効掃流力に関する研究、水理講演会論文集、第30回、pp.247-252, 1986。
- 3.3) 福岡捷二:石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋、水工学に関する夏季研修会講義集Aコース、(社)土木学会、pp.A-1-1 - A-1-25, 2008。
- 3.4) <http://www2.river.go.jp/dam/>
- 4.1) 河村三郎:土砂水理学1、森北出版、pp.1-43,

1982.

- 4.2) 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、土木学会論文集、第206号、pp.59-69, 1972。
- 4.3) Einstein, H. A.: Formulas for the Transportation of Bed Load, Trans. ASCE, Vol. 107, No. 2140, pp.561-577, 1942。
- 4.4) 山本晃一:構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂, pp.54-80, 2004。
- 5.1) 佐々木崇憲・櫻井寿之・箱石憲昭:三春ダム直下流における置土侵食の平面2次元河床変動解析、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、pp.253-254, 2008年
- 5.2) (独)土木研究所:平成20年度重点プロジェクト研究報告書、<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2008/pdf/2008-14-6.pdf>

## A STUDY ON THE SIMULATION MODELING FOR WATER FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT IN RESERVOIRS AND DOWNSTREAM RIVERS

**Abstract:** It is necessary to establish simulation method for estimating environmental changes caused by dam construction and related measures appropriately so that dam project will make progress smoothly, moreover, environmental impact caused by existing dams will also be reduced. Although a large number of studies have been made on the simulation method, it has not been established yet, because the phenomena are complicated and field observation data are few.

This study aims to develop simulation model for water flow and sediment transport in reservoirs and downstream rivers. The contents of the study are as follows: (1) Clarification and modeling of settling condition and erosion condition for small particle sediment, (2) Clarification and modeling of inflow sediment discharge to reservoir and sediment transportation in the downstream rivers, (3) Clarification and modeling of climate impacts affecting to the reservoirs and the downstream rivers, (4) Development of high dimensional numerical simulation model that represents flow phenomena in the reservoirs and the downstream rivers.

In 2009, following items were conducted: investigation on settling velocity test methods for fine sediment, research on the effect of fine sediment particle shape on settling phenomenon, field investigation on upstream area of Shimokubo dam reservoir for inspecting sediment transport characteristics, sediment transport model tests using mixed grain size materials (sand and gravel), application of improved plane two-dimensional river bed movable simulation model to predict the resettled sediment erosion of Koshiyama dam. As a result, the effects of sediment particle shape on settling velocity and characteristics of each settling velocity test methods were understood. By means of field investigation, river bed change and sediment transportation during small flood were revealed. The effects of large stones on sediment discharge rate were clarified quantitatively by movable model tests. It was confirmed that the developed plane two-dimensional model can predict time-series behavior of sediment erosion phenomena during four small floods. But the reproducibility of side bank erosion remains an issue.

**Key words:** dam reservoir, sediment transport, settling velocity test, plane two-dimensional river bed movable model, sediment transport model test using mixed grain size materials