

## 14.6 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（治水勘定）

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、星野公秀

### 【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。

19年度は、微細粒子土砂の沈降速度の試験方法の検討、微細粒子土砂の再浮上（侵食）特性の把握、18年度に改良した二次元河床変動モデルの実験結果及び現地観測結果への適用性の検証、ダム貯水池上下流河川の土砂移動特性を把握するための下久保ダム末端部上流区間における現地調査を実施した。その結果、微細粒子土砂の沈降速度を沈降筒法で行う場合の適切な採水位置や沈降筒形状を提案した。また、微細粒子土砂4種類の侵食実験から、土砂による侵食特性の違いを把握し、侵食速度の検討方法を提案した。改良した二次元河床変動モデルについては、現地スケールの現象をある程度定量的に再現出来ることを確認した。さらに下久保ダムの調査により、過去の河床形状変遷と今後の検討の基本となる河床材料の状況を把握した。

キーワード：ダム貯水池、土砂移動、微細粒子土砂、沈降・再浮上、平面二次元河床変動モデル

### 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。

19年度は、微細粒子土砂の沈降速度の試験方法の検討、微細粒子土砂の再浮上（侵食）特性の把握、18年度に改良した二次元河床変動モデルの置き土侵食実験結果及び現地観測結果への適用性の検証、ダム貯水池上下流河川

の土砂移動特性を把握するための下久保ダム末端部上流区間における現地調査を実施しており、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・散乱法による粒度分布は、沈降実験をもとにした粒度分布と異なる場合があり、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。18年度の研究では、試料を分散処理せずにレーザー回折・散乱法により粒度分布を求めた場合、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した結果となることを報告した。

19年度は、貯水池の濁質の沈降現象を反映した実験方法である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ので報告する。

## 2.2 実験内容

沈降筒法は、円筒形の実験装置に濁水を注入し、濁水の濃度が時間の経過とともに低減する状況を観察し、粒子の沈降速度から粒径を算定する方法である。ここでは以下の3つの観点から実験を行った。なお、沈降筒の測定方法を、表-2.1に示す。

### 2.2.1 SS 測定位置

沈降筒には、表-2.1に示すとおり、試料を採取するためのコックを3か所設けてある。沈降速度の測定には、沈降距離を長く設定した方が信頼性のあるデータを取得できると考えられるが、長さ2mの沈降筒における適切な測定位置を検討するために、採水位置の異なるφ200mm沈降筒を3基並べ、SSの経時変化を測定した。

実験に用いる濁水は、川治ダムおよび桂沢ダムで採取した底泥に蒸留水を加えて濃度を調整した模擬濁水とし、18年度研究と同様の製造方法とした。濁水の初期濃度は、出水時の流入ピーク後を想定し、SS 500 mg/l を目標に調整した。

実験結果を図-2.1~2.2に示す。実験結果は「川治ダム/底面から1.5m」のケースを除き、おおむね、時間の経過とともにSSも減少する結果となった。沈降筒内の濁質がストークスの抵抗則に従って沈降すると仮定すると、SS濃度は時間の経過に伴って単調減少することとなる。長さ2mの沈降筒では、SS測定位置を底面から0.5mまたは1.0mに設定することにより、ストークス則に沿ったデータが取得できると考えられる。

### 2.2.2 沈降筒規模

沈降筒の規模の違いが実験結果に及ぼす影響を検討することを目的に、径の異なる沈降筒を用いて沈降現象を観察した。使用した沈降筒は、φ100mm 4基、φ200mm 1基、φ390mm 1基の計6基である。φ100mmを4基としたのは、採水による水位の低下を小幅に留めるねらいがある。SS測定位置は、底面から0.5m、試料とした濁水は、川治ダム模擬濁水とし、初期濃度がSS 500 mg/lとなるよう調整した。

SSの経時変化を、図-2.3に示す。沈降筒内の濁質がすべてストークスの抵抗則に従って沈降すると仮定すると、採水に伴う水位低下の条件が同一であれば、沈降筒の径にかかわらずSSは同値となることが想定される。しかしながら、φ390mmの沈降筒は、ほかの径に比べ、SS

表-2.1 沈降筒測定方法

測定方法	沈降筒法
測定装置	沈降筒 φ100mm×L=2m (約16リットル) φ200mm×L=2m (約63リットル) φ390mm×L=2m (約240リットル)
測定条件	室温一定(20°C)
測定項目	沈降筒水位、SS、水温
測定手順	沈降筒底面を基準面とし、試料を水位2.0mまで充填する。底面から0.5m,1.0mあるいは1.5mの位置に採水コックを設置し、測定時刻毎に1リットルの採水を行う。ただし、φ100mm沈降筒については、同一条件の沈降筒を4基準備し、採水時刻4回につき1回のローテーションで採水する。
測定時刻	充填直後、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 (計11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時刻より算出する。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。
課題	測定方法の詳細が統一されていない。

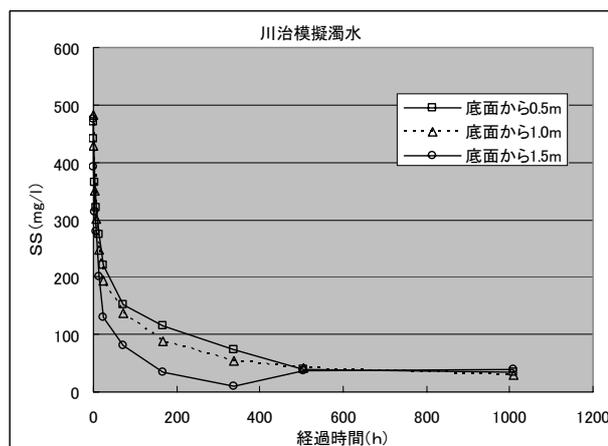


図-2.1 採水位置とSS経時変化(川治ダム)

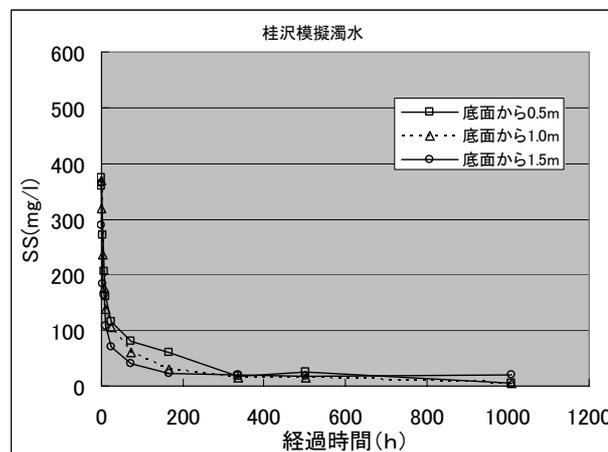


図-2.2 採水位置とSS経時変化(桂沢ダム)

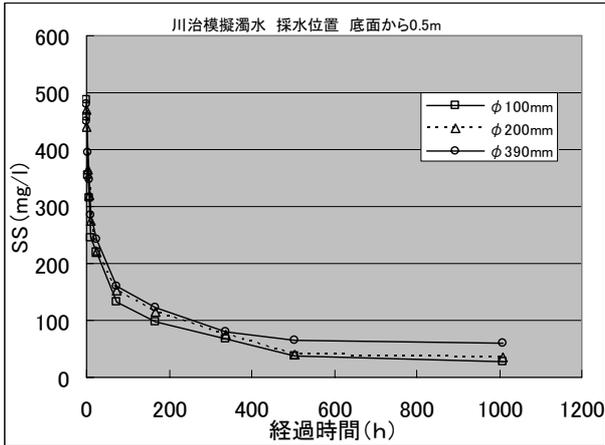


図-2.3 沈降筒径とSS経時変化 (川治ダム)

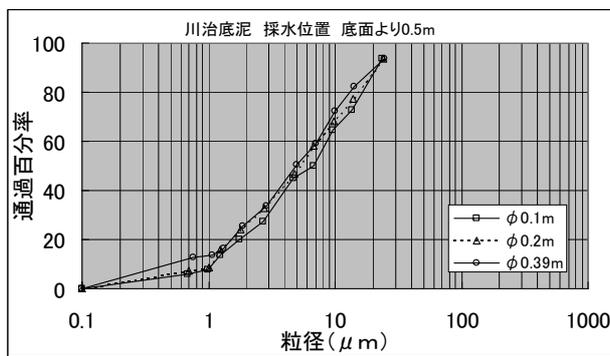


図-2.4 濁質粒度分布 (川治ダム)

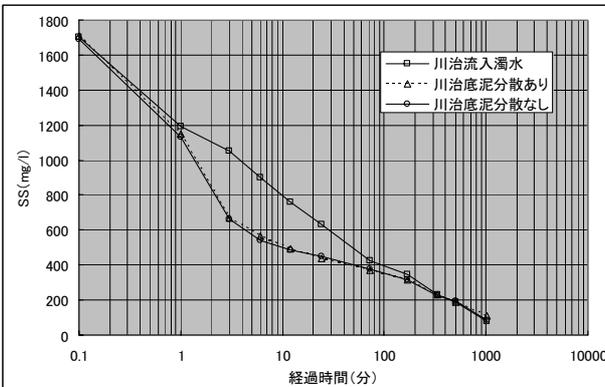


図-2.5 濁水の種類とSS経時変化 (川治ダム)

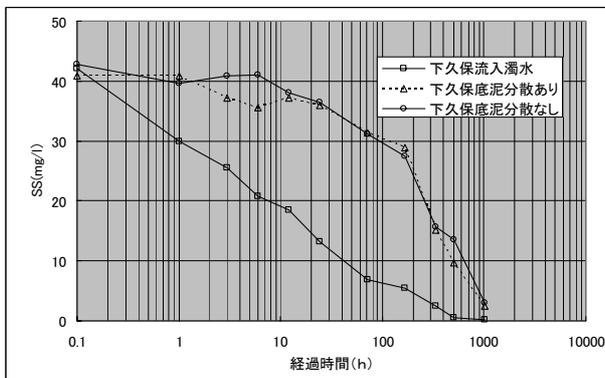


図-2.6 濁水の種類とSS経時変化 (下久保ダム)

の低下が緩やかな結果となった。

測定したSSから粒度分布を求めた結果を、図-2.4に示す。φ390mmから求めた粒度分布は、他の径に比べ1μm以下の微細粒子の割合を多く示す結果となった。実験設備、試料採取の制約を考えると沈降筒は小さな径の方が多くの利点を有するものの、特に微細粒子の流入が課題となっている貯水池においては、可能であればφ390程度の沈降筒を用いて沈降現象を把握することが望まれる。

### 2.2.3 試料とする濁水

以上の実験は、条件を任意に設定する都合上、底泥を材料とした模擬濁水を使用した。しかしながら、模擬濁水と出水時流入濁水では、SSを同一に調整しても、粒度分布は異なることが想定される。そこで、川治ダム・下久保ダムで出水時に採水を行い、両貯水池から採水した濁水とSSを調整した模擬濁水を試料に、沈降状況を比較した。実験にはφ200mmの沈降筒を用い、底面から0.5mの位置でSSを測定した。模擬濁水は、底泥水溶液を超音波分散した濁水と、分散なしの濁水の2種類を準備した。

実験結果を、図-2.5~2.6に示す。川治ダム・下久保ダムいずれのケースについても、流入水と模擬濁水では、濁度の経時変化は異なる結果となった。精度の高い結果を必要とする場合には、1洪水についてSSの異なる流入水を複数回採水し、沈降筒実験を行って粒度分布を求めることが考えられる。しかしながら、たとえ流入水のSSが同一であっても、採水日が異なれば、異なる粒度分布を示すことも想定される。沈降筒実験に適した採水方法、模擬濁水の製造方法については、今後、さらなる検討を要する。

## 3. 微細粒子土砂の再浮上に関する検討

### 3.1 検討の概要

ダム貯水池における土砂輸送及び河床変動に関するシミュレーションにおいて、粘土やシルトといった粘着性を有する微細粒子土砂の再浮上(または侵食)の取扱いが重要である。

粘着性を有する土砂の侵食特性については、既往の研究<sup>1)</sup>により、含水比、粘土の種類、砂の混合率、水温、圧密の履歴(空気中への露出履歴)等の様々な要因と関係があることが指摘されている。これらのパラメータの影響を全て解明することは困難であり、実際に個々の貯水池の問題に対応するためには、対象となる土砂を採取

し、水理実験による試験を実施することで侵食特性を把握することが現実的と考えられる。

18年度の検討により、粘着性を有する微細粒子土砂の侵食の挙動は、煙状の侵食が始まる状態（侵食状態Ⅰ）と局所的な激しい侵食が始まる状態（侵食状態Ⅱ）に区分することができ、河床変動に大きく寄与する侵食状態Ⅱとなる侵食限界が重要という結論を得た。

19年度は4種類の土砂について流量条件を変化させて侵食実験を行い、摩擦速度と侵食限界の条件及び侵食速度との関係や、そのぼらつきの特性を検討した。また、4種の土砂の内、鯖石川ダムの堆積土砂については、以前に幅60cm、長さ6mの侵食試験面積を有する水路を用いた実験による検討を行っており、今回の幅10cmの水路を用いた実験結果との比較検討を行った。

### 3.2 検討方法

実験は、長さ14m×幅0.1m×高さ0.2mの透明アクリル樹脂製の矩形管路を、整流水槽に接続した模型を用いて実施した（図-3.1、3.2）。管路の上流端から4～10mの長さ6mの区間は、底面を0.1m切り下げ、高さ0.3mとしており、この落差0.1m部分に土砂を敷き詰めて通水した。実験では、含水比を調節して土砂を設置し、通水を行った。

侵食限界を把握する目的の実験では、流量を徐々に増加させて、侵食状況を観察した。



図-3.1 侵食実験水路の概要（下流から撮影）

侵食速度を把握する目的の実験では、一定の流量をある程度土砂が侵食されるまで通水し、流量と土砂設置区間のピエゾ水頭を計測することでエネルギー勾配を把握して摩擦速度を算定した。また、実験終了後にレーザー計測器で侵食形状を縦断方向に1cm刻みで11測線計測して侵食された体積を算定した。

検討に用いた土砂は、市販されているT.Aカオリン、美和ダム貯水池（長野県）の堆積土砂、鯖石川ダム貯水池（新潟県）の堆積土砂、真名川ダム（福井県）貯水池の堆積土砂の4種類である。T.Aカオリンについては、これまでの既往の研究<sup>1)</sup>の蓄積が多く、既往の知見と比較して実験手法の検証を行うことを目的として選定した。

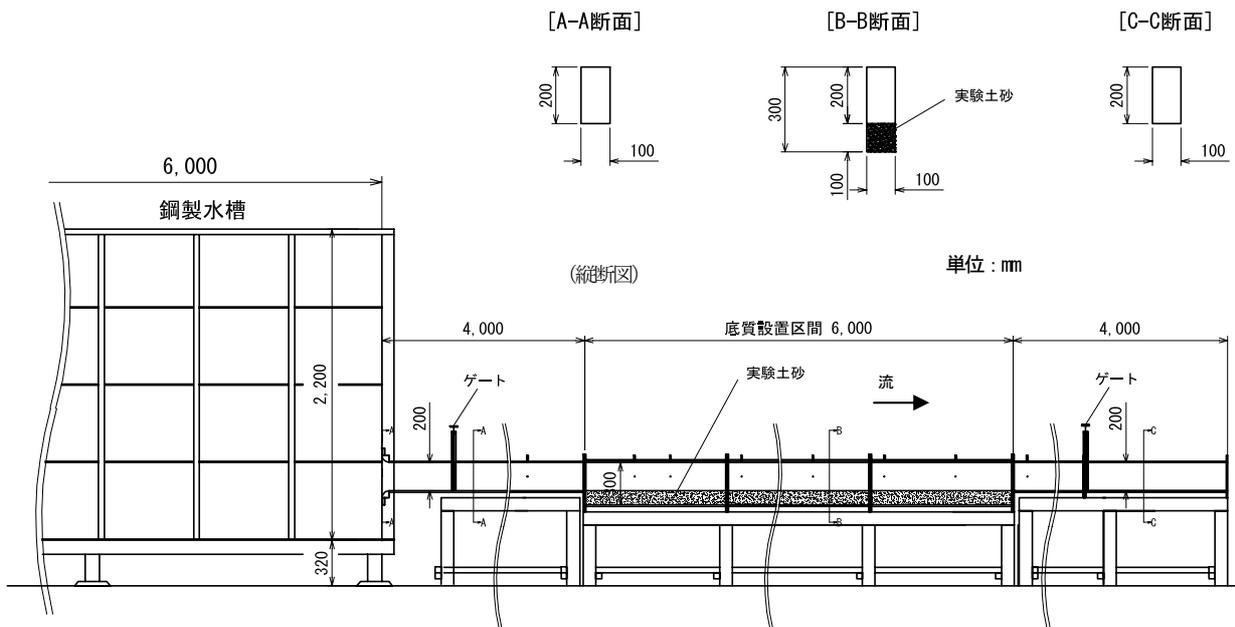


図-3.2 侵食実験水路形状

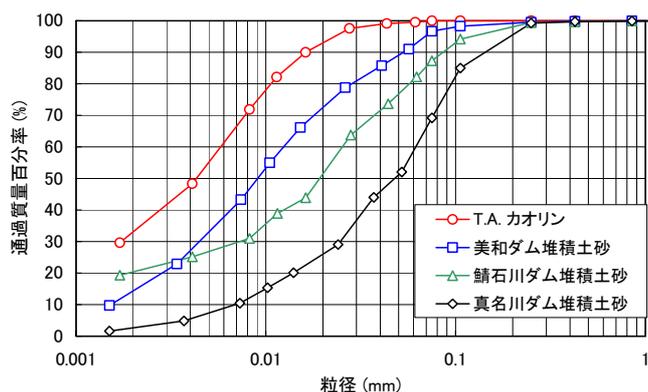


図-3.3 実験に用いた土砂の粒度分布

表-3.1 侵食限界実験の結果

試料名	水温 (°C)	含水比 (%)	侵食限界摩擦速度 (侵食限界 I) (m/s)	侵食限界摩擦速度 (侵食限界 II) (m/s)
T. A カオリン	18.0	73.6	0.010	—
美和ダム堆積土砂	15.1	52.2	0.015	0.044
鯖石川ダム堆積土砂	10.6	77.3	0.042	0.044
真名川ダム堆積土砂	5.3	99.3	0.012	0.027
真名川ダム堆積土砂	4.5	80.5	0.016	0.028

注: 侵食限界 I は煙状の侵食が始まる限界。

注: 侵食限界 II は局所的な激しい侵食(または顕著な侵食)が始まる限界。

注: カオリンは侵食限界 II は明瞭でなかった。

含水比の設定については、美和ダムと鯖石川ダムについては、現地のボーリング調査による含水比程度(それぞれ50%程度と75%程度)とし、T.Aカオリンについては、これまでにデータの蓄積の多い鯖石川ダムと同程度の75%とし、真名川ダムについては、沈降堆積実験の結果から、100%程度と80%強を選定した。

### 3.3 検討結果

#### 3.3.1 粒度分布

実験に用いた4種の土砂の粒度分布の分析結果を図-3.3に示す。これより、T.Aカオリン、美和ダム、鯖石川ダム、真名川ダムの堆積土砂の順に粒度が粗く、50%粒径でみると、それぞれ4.4、9.2、19.8、48.3 $\mu\text{m}$ である。全ての試料で2mm以上の成分はなく、粘土およびシルト成分が大半を占めているが、砂成分(0.075mm以上)は上述の順で、0.0、3.3、12.7、30.8%存在し、粘土成分(0.005mm以下)は、53.5、31.0、26.4、6.8%となっている。

#### 3.3.2 侵食状況と侵食限界

侵食状況について以下に土砂毎に侵食限界を把握する

ために実施した実験の結果を示す。

##### ①T.Aカオリン

流量を2L/sから開始した。流量を4L/sまで増加させると、河床の近くで濁りが発生した。その後は流量の増加とともに、濁りが徐々に濃くなり、流量が8L/sになったときに濁りが急に濃くなり、河床表面に流下方向の筋が現れた。その後は、流量の増加とともに河床波が現れ、濁りが濃くなったが、局所的な激しい侵食は認められなかった。

##### ②美和ダムの堆積土砂

流量4L/sから開始し、最初からかすかに濁りが発生した。流量が6L/sの時点で濁りが明確に発生した。15L/sになると、局所的に少し土砂が削られ始めた。20L/s程度になった時点で、河床全面が一気に侵食された。

##### ③鯖石川ダムの堆積土砂

流量10L/sから開始したが、侵食や濁りは発生しなかった。流量を増加させていくと、局所的に穴が空き、穴が徐々に下流方向に大きくなる様子が観察されたが、全体の侵食はほとんど進まない。19L/sまで流量が増加した時点で、濁りが濃くなり、侵食量の急な増加が認められた。

##### ④真名川ダムの堆積土砂

真名川ダムの土砂については、含水比が90%程度の場合と100%程度の場合の2条件について検討した。含水比90%の場合には、流量が7L/s程度で濁りが発生し始めて、14L/sまで増加すると、侵食の進行が認められたが、局所的に激しく侵食される様子はみられなかった。含水比100%の場合には5~7L/s程度で濁りの発生が認められ、10~12L/sで侵食の進行が確認された。90%と同様に局所的な侵食は認められなかった。

以上の結果から、T.Aカオリンと美和ダムおよび真名川ダムの堆積土砂は、比較的小さい流量から濁りが生じ始めるが、鯖石川ダムの土砂は濁りが発生し始める流量が大きい。また、侵食の進展については、美和ダムと鯖石川ダムの堆積土砂では、侵食が一気に進む現象が明確に認められたが、T.Aカオリンと真名川ダムの土砂では、徐々に侵食量が増加していく侵食形態であった。特に鯖石川ダムの土砂は、濁りの発生と侵食の急激な進展がほぼ同時に発生した。

実験結果から、煙状の侵食が始まる状態(侵食状態I)と局所的な激しい侵食が始まる状態(侵食状態II)の侵食限界摩擦速度を求めた結果を表-3.1に示す。なお、限界の判定は目視観察により行った。また、真名川ダム

の土砂では、ピエゾ水頭を測定していたので、この結果から摩擦速度を求めたが、他の土砂については、流量のデータを用いて水路の流量と摩擦速度の関係から摩擦速度を求めた。

### 3.3.3 侵食速度

実験条件と結果を表-3.2 に示す。表中には過去の幅60cmの水路を用いた実験結果(ケースC-2-1~C-2-6)も合わせて示している。なお、土砂に作用する摩擦速度の算定には以下に示す底面とそれ以外の壁面の掃流力を簡易に分離する手法を用いた。

管路において底面とその他の壁面の掃流力(抵抗)を分離し、力の釣り合いの関係から以下の式が得られる。

$$\rho g(BHL)I_s = \tau_{bed}BL + \tau_{wall}(B+2H)L \quad (3.1)$$

ここで、 $\rho$ :水の密度、 $g$ :重力加速度、 $B$ :水路幅、 $H$ :水路高さ、 $L$ :水路長さ、 $I_s$ :土砂を流したときのエネルギー勾配、 $\tau_{bed}$ :底面の掃流力、 $\tau_{wall}$ :底面以外の壁面の掃流力を表す。

式を変形すると

$$\tau_{bed} = \rho g H I_s - \frac{B+2H}{B} \tau_{wall} \quad (3.2)$$

平均的な掃流力とエネルギー勾配との関係より

$$\rho g(BHL)I_s = \tau_m(2B+2H)L \quad (3.3)$$

ここで、 $\tau_m$ :水路の平均的な掃流力を表す。

式(3.1)、(3.2)より底面の掃流力の算定式を求めると

$$\tau_{bed} = \frac{1}{B} \{ (2B+2H)\tau_m - (B+2H)\tau_{wall} \} \quad (3.4)$$

$$\tau_m = \rho g R I_s \quad (3.5)$$

$$\tau_{wall} = \rho g R I_w = \frac{\rho g n_w^2 V^2}{R^{1/3}} \quad (3.6)$$

幅10cm×高さ20cmの実験水路の場合

$$n_w = 0.0254 R_e^{-0.1135} \quad (3.7)$$

幅60cm×高さ20cmの実験水路の場合

$$n_w = 0.0506 R_e^{-0.1588} \quad (3.8)$$

$$R_e = \frac{RV}{\nu} \quad (3.9)$$

ここで、 $I_w$ :水のみ流下した場合のエネルギー勾配(全ての壁面が固定床の場合)、 $n_w$ :底面以外の壁面のマンニングの粗度係数、 $R$ :径深、 $V$ :断面平均流速、 $R_e$ :レイノ

ルズ数、 $\nu$ :動粘性係数を表す。

上式は実験式であり、実験時のレイノルズ数 $R_e$ の範囲は幅10cmの水路で6,100~61,000、幅60cmの水路で15,000~75,000である。

ただし、上記の計算を行って、 $\tau_{bed}$ が $\tau_m$ よりも小さくなる場合には、 $\tau_{bed}$ の値として $\tau_m$ を用いた。

底面の摩擦速度は次式で求めた。

$$u_{*bed} = \sqrt{\frac{\tau_{bed}}{\rho}} \quad (3.10)$$

ここで、 $u_{*bed}$ :底面の摩擦速度を表す。

実験結果の摩擦速度と侵食速度の関係を図-3.4~3.8に示す。図は通常の日盛と対数日盛の両方で作成しており、図-3.4には全ての実験結果を、その他は土砂の種類毎の結果を示した。また、図中には関根ら<sup>1)</sup>によって提案された以下の形式の侵食速度式を示している。

$$E = \alpha u_*^3 \quad (3.11)$$

ここで、 $\alpha$ :定数( $s^2/m^2$ )、 $E$ :侵食速度(m/s)、 $u_*$ :摩擦速度(m/s)(図中では上述の底面の摩擦速度を用いている)を表す。

図中に示した定数 $\alpha$ の値は、式形との相関が高かったT.Aカオリンと真名川ダム堆積土砂については、実験値を近似する値を、結果のばらつきが大きい美和ダムと鯖石川ダムの堆積土砂については、おおよその上限と下限を示す値を示した。線の始端はそれぞれ侵食限界IIの摩擦速度とした(T.Aカオリンについては侵食限界I)。

定数 $\alpha$ ( $s^2/m^2$ )の値について以下にまとめる。

- ・T.Aカオリン:  $\alpha=0.05$  (含水比75%程度)
- ・美和ダム:  $\alpha=0.02\sim0.10$  (含水比50%程度)
- ・鯖石川ダム:  $\alpha=0.03\sim0.28$  (含水比75%程度)
- ・真名川ダム:  $\alpha=0.30$  (含水比80%強)
- $\alpha=1.30$  (含水比100%程度)

T.Aカオリンの値については、関根ら<sup>1)</sup>により、下記の式が提案されている。

$$E = \alpha_0 R_{wc}^{2.5} u_*^3 \quad (3.12)$$

ここで、 $\alpha_0$ :定数( $s^2/cm^2$ )、 $R_{wc}$ :粘土中の水含有率を表す。この式から、今回の実験の比例定数を求めると、 $\alpha = \alpha_0 R_{wc}^{2.5} \times 10000 = 0.056 s^2/m^2$ となり、今回の結果とほぼ一致する。なお、 $\alpha_0$ については、夏季と冬季でそれぞれ値が求められているが、今回のT.Aカオリンの実験時水温から、夏季の値である $1.15 \times 10^{-5} s^2/cm^2$ を用いた。また、 $R_{wc}$ については、粘土含有率が100%の場合に

表-3.2 侵食速度実験の条件および結果

ケース名	水路幅(m)	試料名	流量(L/s)	水温(°C)	含水比(%)	目標含水比(%)	侵食速度(mm/s)	エネルギー勾配(-)	摩擦速度(底面)(m/s)
A-1	0.1	カオリン	16.0	18.2	75.4	75	0.0013	0.0045	0.051
A-2	0.1	カオリン	16.0	18.6	75.1	75	0.0019	0.0046	0.053
A-3	0.1	カオリン	16.0	18.6	75.8	75	0.0021	0.0048	0.057
A-4	0.1	カオリン	20.0	18.0	74.7	75	0.0056	0.0071	0.068
A-5	0.1	カオリン	20.0	18.2	74.3	75	0.0077	0.0066	0.060
A-6	0.1	カオリン	20.0	19.0	75.1	75	0.0070	0.0067	0.061
A-7	0.1	カオリン	24.0	16.2	74.2	75	0.0268	0.0102	0.083
A-8	0.1	カオリン	24.0	16.5	74.5	75	0.0259	0.0098	0.078
A-9	0.1	カオリン	24.0	17.0	75.5	75	0.0191	0.0094	0.074
A-10	0.1	カオリン	28.0	18.2	72.5	75	0.0473	0.0142	0.104
A-11	0.1	カオリン	28.0	18.8	75.0	75	0.0465	0.0139	0.102
A-12	0.1	カオリン	28.0	18.8	73.6	75	0.0457	0.0136	0.099
B-1	0.1	美和ダム堆積土砂	16.0	15.2	49.0	50	0.0018	0.0047	0.052
B-2	0.1	美和ダム堆積土砂	16.0	14.0	47.9	50	0.0012	0.0049	0.056
B-3	0.1	美和ダム堆積土砂	16.0	14.5	49.1	50	0.0004	0.0049	0.056
B-4	0.1	美和ダム堆積土砂	20.0	14.0	48.3	50	0.0076	0.0069	0.063
B-5	0.1	美和ダム堆積土砂	20.0	15.0	50.2	50	0.0059	0.0071	0.066
B-6	0.1	美和ダム堆積土砂	20.0	14.8	48.6	50	0.0007	0.0070	0.064
B-7	0.1	美和ダム堆積土砂	24.0	15.2	49.8	50	0.1644	0.0104	0.085
B-8	0.1	美和ダム堆積土砂	24.0	15.2	49.9	50	0.0246	0.0099	0.080
B-9	0.1	美和ダム堆積土砂	24.0	15.0	49.9	50	0.0062	0.0097	0.077
B-10	0.1	美和ダム堆積土砂	28.0	16.0	51.7	50	0.0502	0.0122	0.082
B-11	0.1	美和ダム堆積土砂	28.0	16.0	52.2	50	0.0336	0.0123	0.083
B-12	0.1	美和ダム堆積土砂	28.0	16.0	51.6	50	0.0229	0.0127	0.087
C-1-1	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	17.0	9.0	78.5	75	0.0126	0.0042	0.037
C-1-2	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	17.0	9.2	76.5	75	0.0009	0.0050	0.048
C-1-3	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	18.0	10.0	74.4	75	0.0121	0.0049	0.040
C-1-4	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	19.0	11.8	72.5	75	0.0004	0.0055	0.044
C-1-5	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	19.0	9.5	75.0	75	0.0022	0.0055	0.043
C-1-6	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	22.0	12.0	73.7	75	0.1083	0.0092	0.080
C-1-7	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	22.0	11.8	78.2	75	0.0491	0.0095	0.085
C-1-8	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	22.0	12.0	77.9	75	0.0834	0.0095	0.085
C-1-9	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	25.0	10.5	75.3	75	0.2212	0.0119	0.094
C-1-10	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	25.0	10.0	75.5	75	0.2080	0.0117	0.092
C-1-11	0.1	鯖石川ダム堆積土砂	25.0	10.5	75.4	75	0.0983	0.0109	0.082
C-2-1	0.6	鯖石川ダム堆積土砂	180.0	23.2	80.7	70~80	0.0033	0.0051	0.068
C-2-2	0.6	鯖石川ダム堆積土砂	190.0	18.7	79.9	70~80	0.0103	0.0054	0.067
C-2-3	0.6	鯖石川ダム堆積土砂	190.0	24.0	73.1	70~80	0.0182	0.0062	0.079
C-2-4	0.6	鯖石川ダム堆積土砂	210.0	22.2	78.7	70~80	0.0638	0.0079	0.092
C-2-5	0.6	鯖石川ダム堆積土砂	210.0	24.5	70.2	70~80	0.0716	0.0076	0.089
C-2-6	0.6	鯖石川ダム堆積土砂	230.0	25.2	67.6	70~80	0.1303	0.0076	0.083
D-1-1	0.1	真名川ダム堆積土砂	12.1	4.5	78.9	80	0.0058	0.0024	0.028
D-1-2	0.1	真名川ダム堆積土砂	18.0	4.5	78.4	80	0.1059	0.0062	0.061
D-1-3	0.1	真名川ダム堆積土砂	21.0	4.5	83.0	80	0.1965	0.0087	0.078
D-1-4	0.1	真名川ダム堆積土砂	24.0	4.6	75.6	80	0.2395	0.0110	0.087
D-1-5	0.1	真名川ダム堆積土砂	26.0	4.0	83.5	80	0.2354	0.0135	0.100
D-1-6	0.1	真名川ダム堆積土砂	26.1	4.5	87.5	80	0.3426	0.0171	0.131
D-1-7	0.1	真名川ダム堆積土砂	28.0	4.5	74.5	80	0.6803	0.0143	0.098
D-1-8	0.1	真名川ダム堆積土砂	28.1	4.0	82.5	80	0.3232	0.0160	0.112
D-2-1	0.1	真名川ダム堆積土砂	14.1	8.8	102.6	100	0.1658	0.0042	0.054
D-2-2	0.1	真名川ダム堆積土砂	16.1	8.2	103.4	100	0.3351	0.0057	0.066
D-2-3	0.1	真名川ダム堆積土砂	18.2	7.2	96.1	100	0.3569	0.0069	0.070
D-2-4	0.1	真名川ダム堆積土砂	20.1	7.8	102.7	100	0.5797	0.0076	0.070
D-2-5	0.1	真名川ダム堆積土砂	22.0	8.0	100.4	100	0.6049	0.0094	0.081
D-2-6	0.1	真名川ダム堆積土砂	23.9	9.0	98.6	100	1.0105	0.0114	0.094
D-2-7	0.1	真名川ダム堆積土砂	24.0	6.3	97.2	100	1.5304	0.0124	0.102

注：含水比は実験終了後に採取した土砂試料より求めた。

注：侵食速度は侵食体積を計測面積と通水時間で除して求めた。

注：エネルギー勾配はピエゾ水頭の勾配から求めた。なお、ピエゾ水頭が安定する開始から20秒程度の値を用いた。

注：摩擦速度は本文に示した手法で底面の値を求めた。

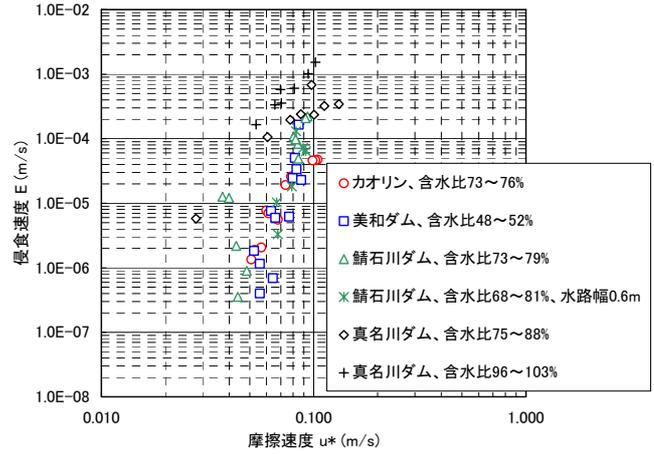
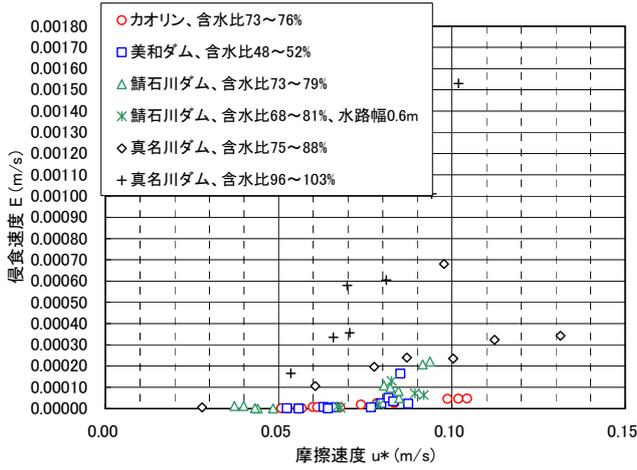


図-3.4 摩擦速度と侵食速度の関係 (全ケース)

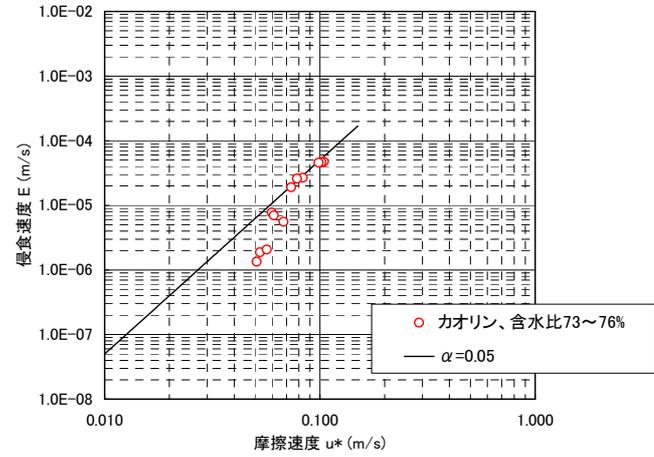
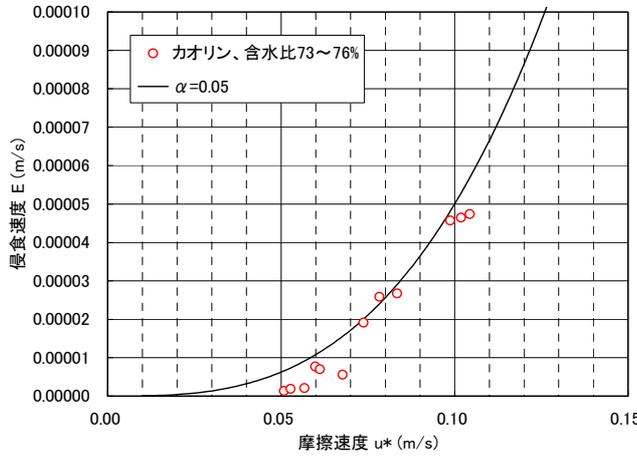


図-3.5 摩擦速度と侵食速度の関係 (T.A カオリン)

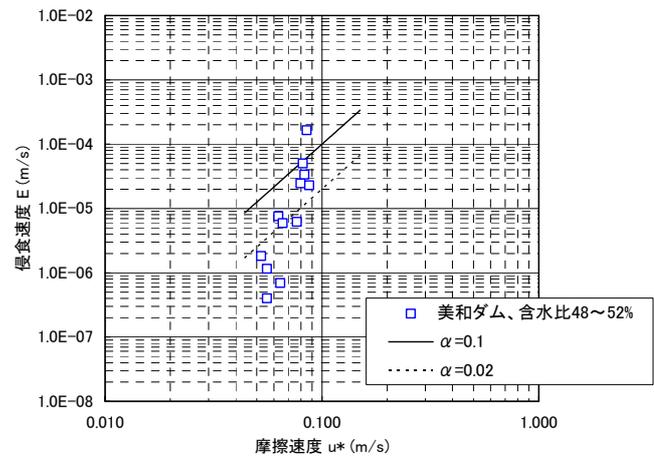
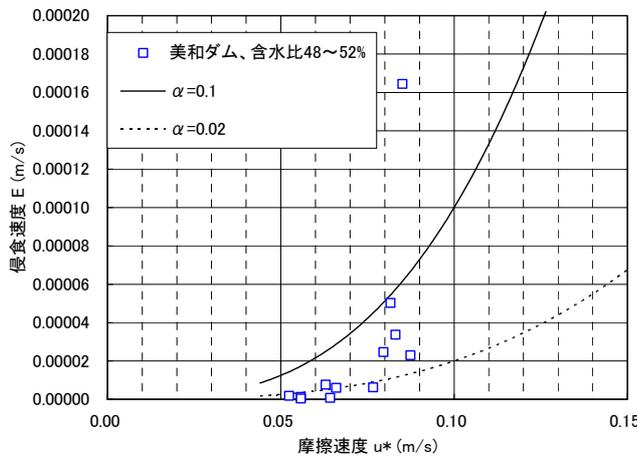


図-3.6 摩擦速度と侵食速度の関係 (美和ダム堆積土砂)

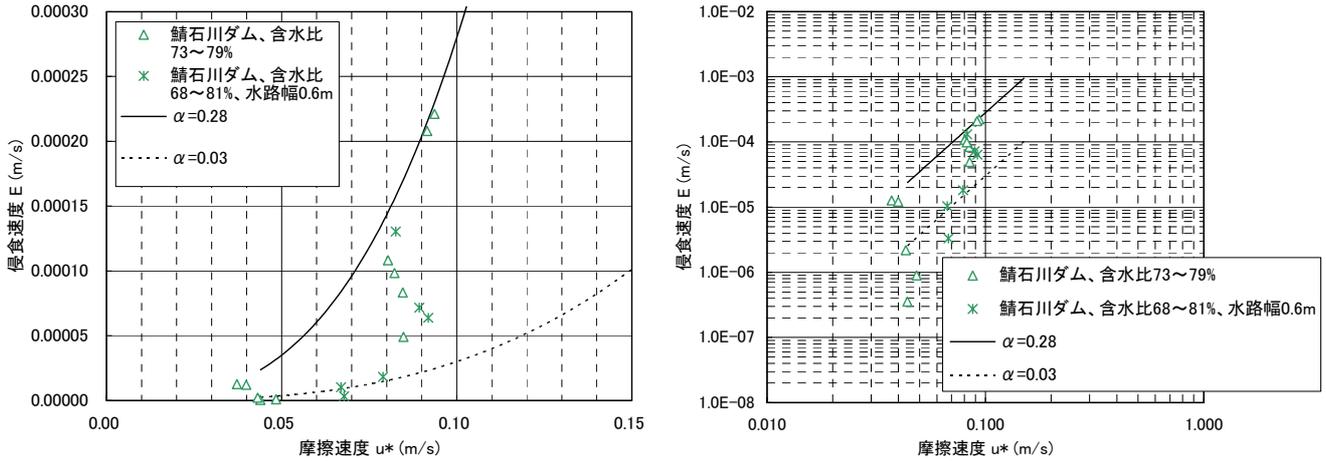


図-3.7 摩擦速度と侵食速度の関係（鯖石川ダム堆積土砂）

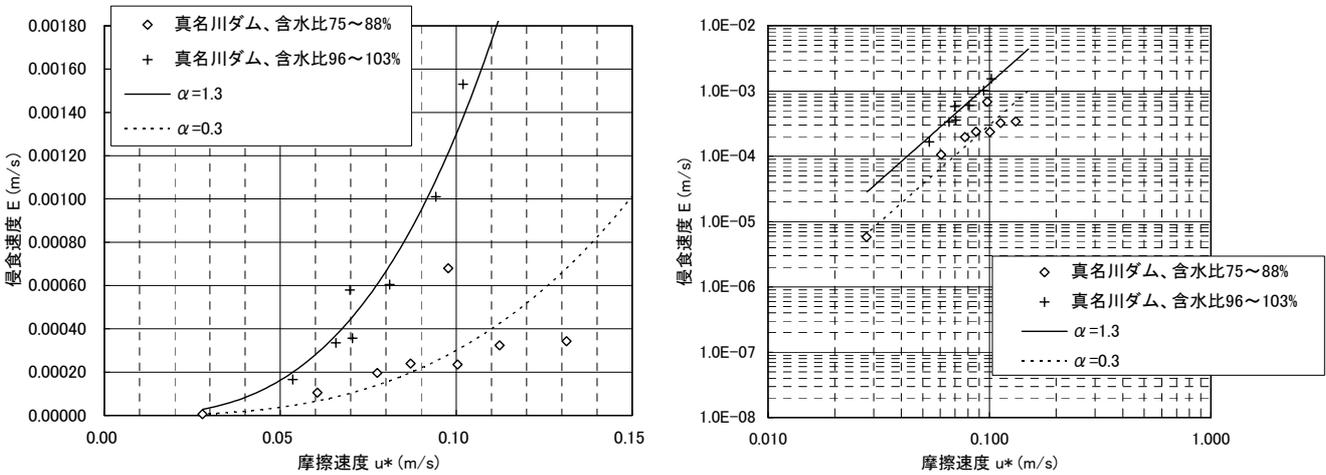


図-3.8 摩擦速度と侵食速度の関係（真名川ダム堆積土砂）

は含水比と同じとなるため、0.75 を用いた。

T.A カオリンについては、結果のばらつきが小さく、摩擦速度が大きい領域では式(3.11)でよく近似される。一方、美和ダムと鯖石川ダムの堆積土砂については、ばらつきが大きい。

鯖石川ダムの土砂については、試験水路の幅が 60cm と 10cm の両者の結果を比較すると、60cm 幅の方が侵食速度の小さい方向へのばらつきが大きい、大きい方の値はほぼ同様であり、上限値の検討においては両者の結果に大きな差はないと考えられる。

真名川ダムの堆積土砂については、含水比 100%程度については、式(3.11)でよい近似が得られている。含水比が小さい80%強については、ややばらつきが大きい。

図-3.9、3.10 に各土砂の比較的流量が大きい条件での実験における実験終了後の侵食形状を示す。この結果

より、侵食速度にばらつきの大きい美和ダムや鯖石川ダムの堆積土砂の侵食形状は、局所的な深掘れが生じている。美和ダムや鯖石川ダムの堆積土砂については、ここに示した以外の結果についても、このような傾向が認められ、深掘れが生じる位置も実験によって異なっている。一方、結果のばらつきが小さいT.A カオリンと真名川ダム堆積土砂の含水比 100%程度については全面的に様に侵食されている。ややばらつきの多い真名川ダム堆積土砂の含水比 80%強の土砂については、侵食面の変動が大きいものの全面で侵食が生じている。

以上のように、土砂の種類（粒度分布）や含水比によって、侵食の形態に特色があり、今回の結果からは、砂成分がほとんどなく粒度の最も小さいT.A カオリンと砂成分が 30%程度有り粒度の最も大きい真名川ダムの堆積土砂が一様に侵食され侵食速度式でよく近似できる結

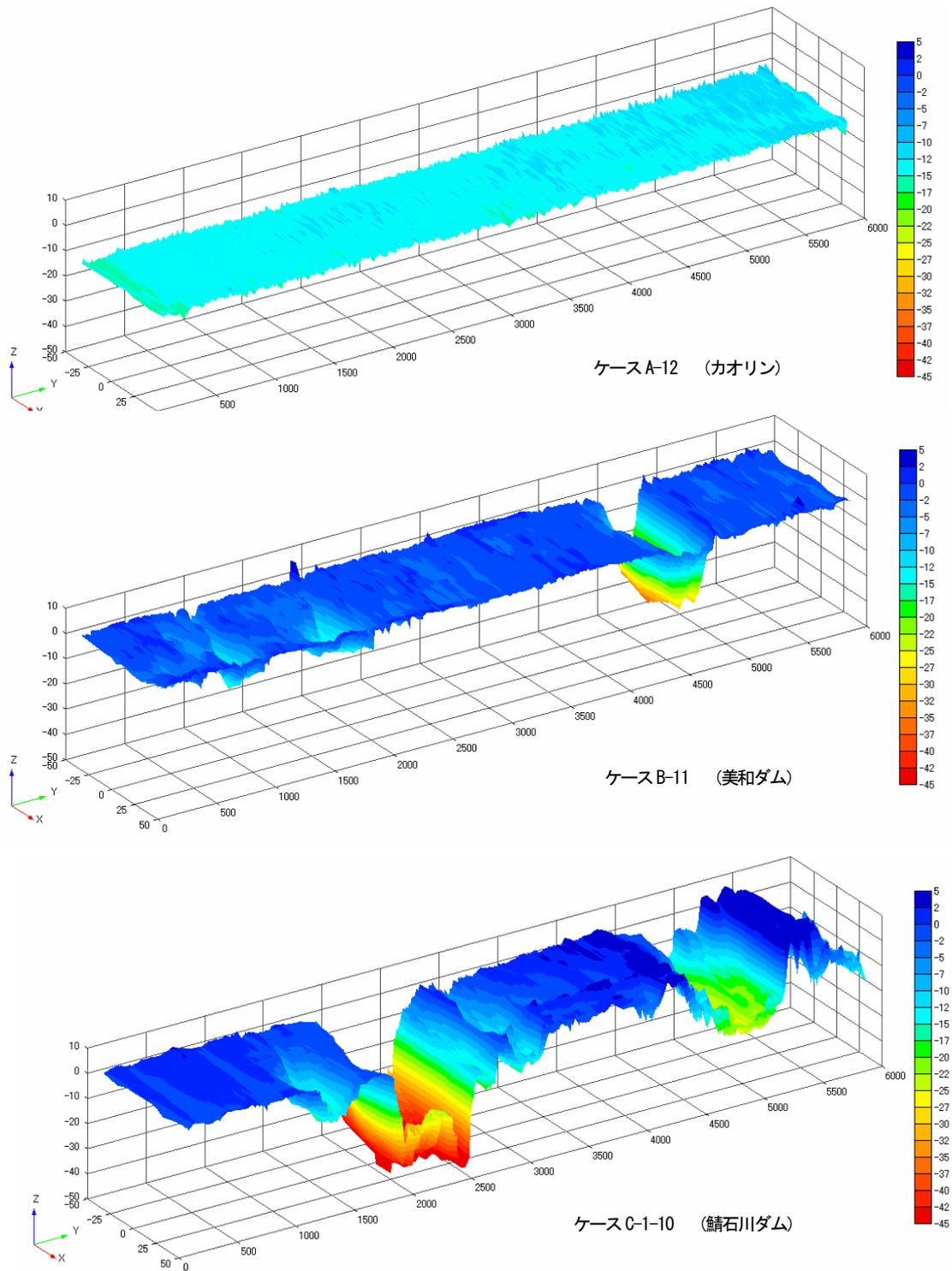


図-3.9 実験終了後の侵食形状 (1)

果を示し、その中間的な粒度分布の美和ダムと鯖石川ダムは局所的に激しい侵食がみられ侵食速度の結果のばらつきが大きかった。

今回の結果より、堆砂の予測及び堆砂対策の効果の検討や侵食による濁水発生の検討において、侵食速度を推定する場合には、はじめに掃流力を増加させつつ、侵食限

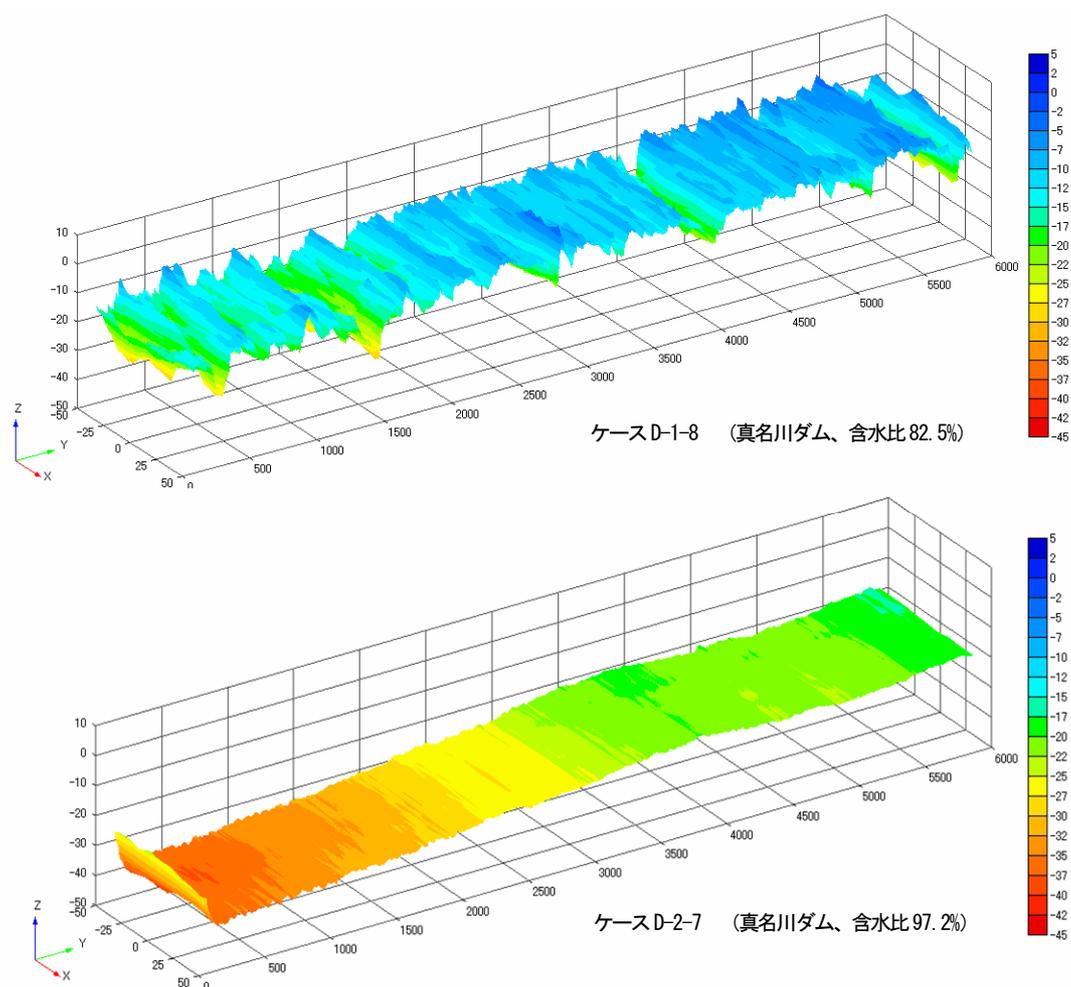


図-3.9 実験終了後の侵食形状(2)

界と侵食の進行状態を確認し、一様な侵食を示す場合は、侵食速度の実験により侵食速度式のパラメータを同定して検討に用いることができる。局所的な侵食を示す場合には、侵食速度のばらつきをある程度把握する実験を行い、下限から上限までパラメータの幅を把握して、その幅の範囲で複数の条件で検討を行う必要があると考える。

#### 4. 平面2次元河床変動モデルの開発

##### 4.1 開発の概要

貯水池の堆砂現象やフラッシング等による排砂、さらには下流への置土等による土砂供給において、河床変動の予測をする場合に、横断方向の変化が大きい条件では平面2次元河床変動モデルが有用と考えられる。モデルについては、これまで多くの研究がなされているが、貯水池の条件の複雑さもあり、貯水池に関連する河床変動を精度良く再現できるモデルが求められている。

そこで、土木研究所では、そのようなモデルの開発を目的として研究を行っており、これまでに、水中安息角を用いた側岸侵食を組み込んだ非平衡の浮遊砂の輸送と混合粒径に対応した平面2次元掃流砂浮遊砂混合粒径モデル(以下、新モデルと称する)を開発してきている<sup>2),3)</sup>。そこで、19年度は、過去に行われた置土水理模型実験結果を用い、新モデルの動作を確認するとともに、実験結果および過去の掃流砂のみを扱う一様粒径モデル(以下、旧モデルと称する)の結果との比較検証を行った。さらに、現地スケールへの適用も視野に入れ、今年度行われた三春ダム直下流での置土侵食現地観測との比較検証も行った。なお、モデルについては、基礎式を図-4.1に示すが、詳細については18年度の報告書<sup>2)</sup>を参照されたい。

##### 4.2 実験スケール現象への適用

###### 4.2.1 水理模型実験概要

水理模型実験は、置土の基本的な侵食、流下特性を把握するために行われている。実験水路は幅1m、長さ11m、

(連続式)

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

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial UM}{\partial x} + \frac{\partial WM}{\partial z} = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial x}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( \overline{vh} \frac{\partial U}{\partial x} - \overline{uu}h \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{vh} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{uv}h \right) - \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bz}}{\rho_0}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial UN}{\partial x} + \frac{\partial WN}{\partial z} = -gh \frac{\partial(h+y_b)}{\partial z}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( \overline{vh} \frac{\partial W}{\partial x} - \overline{vw}h \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{vh} \frac{\partial W}{\partial z} - \overline{ww}h \right) - \frac{\tau_{sz}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bz}}{\rho_0}$$

(粒徑別浮遊砂輸送方程式)

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

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

(流砂の連続式)

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

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

(交換層内における粒徑別土砂収支式)

河床上昇時

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

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<sub>b</sub>: 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,  $\overline{uu}$ ,  $\overline{uv}$ ,  $\overline{ww}$ :  $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{u'w'}$ ,  $\overline{w'w'}$  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,  
 v: 動粘性係数, ρ: 流体の密度, ρ<sub>0</sub>: 流体の基準密度, τ<sub>xy</sub>, τ<sub>yz</sub>, τ<sub>zx</sub>, τ<sub>zy</sub>: 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<sub>Bx</sub>, q<sub>Bz</sub>): x方向, z方向の単位幅当たり掃流砂量(m<sup>2</sup>/s), λ: 河床の間隙率(空隙率),  $\overline{C}_k$ : 粒徑別断面平均浮遊砂濃度(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), D<sub>h</sub>: 水平方向の拡散係数(移動粘性係数), q<sub>up</sub>: 単位面積当り浮遊砂浮上フラックス(m/s), q<sub>down</sub>: 単位面積当り浮遊砂沈降フラックス(m/s), (q<sub>Bx</sub>, q<sub>Bz</sub>): x方向, z方向の粒徑別単位幅掃流砂量, P<sub>sk</sub>: 交換層に占める各粒徑成分の割合, y<sub>sa</sub>: 交換層厚(m), y<sub>sb</sub>: 交換層を除いた河床厚(m), P<sub>sik</sub>: Δt前のP<sub>sk</sub>, P<sub>ok</sub>: 交換層直下の土質ブロックに占める各粒徑成分の割合

図-4.1 基礎式

勾配1/100の直線水路である。実験は、時系列での下流端における流下土砂量と置土形状変化が測定されている。模型は、底板および片側の側壁が木製であり、もう一方の側壁はアクリル板が設置されている。図-4.2に実験水路の概要を示す。

4.2.2 計算条件

上記水理模型実験のうち検証に用いた実験条件は、置土幅0.2m、置土長8.0m、置土高0.1m、粒徑1.2m、流量20L/sのケースである。図-4.3に置土実験初期形状を示す。

計算モデルは、流下方向に-1.0~0.5mまでは0.25m、0.5m~9mまでは0.1m、それ以降は0.25mに分割し、横断方向は0m~0.5mまでは0.025m、0.5m~1mでは0.05mに分割した。また、交換層厚は2mm、粒度分布を記憶する層厚は5mmとし、計算時間間隔は0.005秒とした。境界条件については、実験で得られた結果から上流端に流量、下流端に水位を与えた。Manningの粗度係数については、固定床土の土砂移動であることを固定床では実験結果より得られた0.009 m<sup>-1/3</sup>sとし、固定床と移動床の中間状態(堆砂厚が粒徑の2倍まで)では粗度を0.02 m<sup>-1/3</sup>sとし、移動床(堆砂厚が粒徑の2倍以上)については次に示すStricklerの式を用いた。

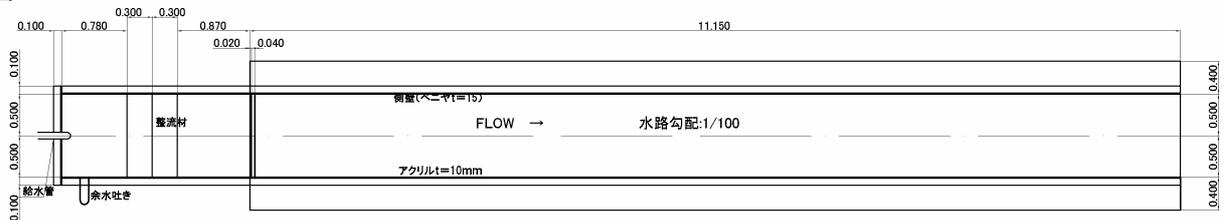
$$n = 0.0131d^{1/6} \tag{4.1}$$

ここに、n: Manningの粗度係数, d: 粒徑(mm)を表す。

4.2.3 解析結果

図-4.4は実験結果と各計算結果における流下土砂量の比較である。実験結果と計算結果では、計算結果が20分~80分後にかけて若干大きくなるが、土砂の侵食が終了する時刻はほぼ等しい。また、旧モデルと新モデルの比較では概ね結果は一致している。

平面図



縦断面図

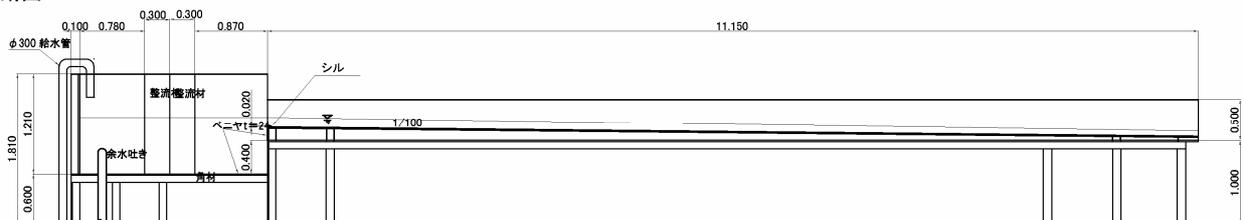


図-4.2 置土実験模型

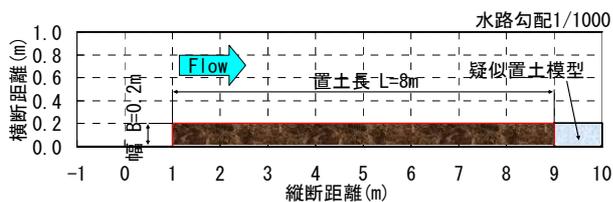


図-4.3 置土初期形状

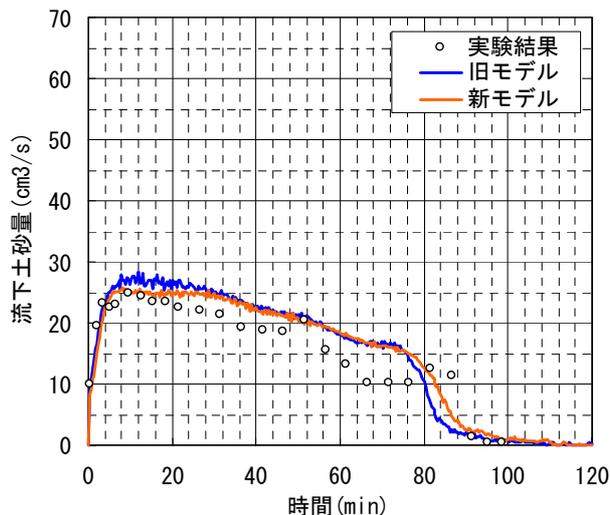


図-4.4 実験結果と計算結果の流下土砂量の比較

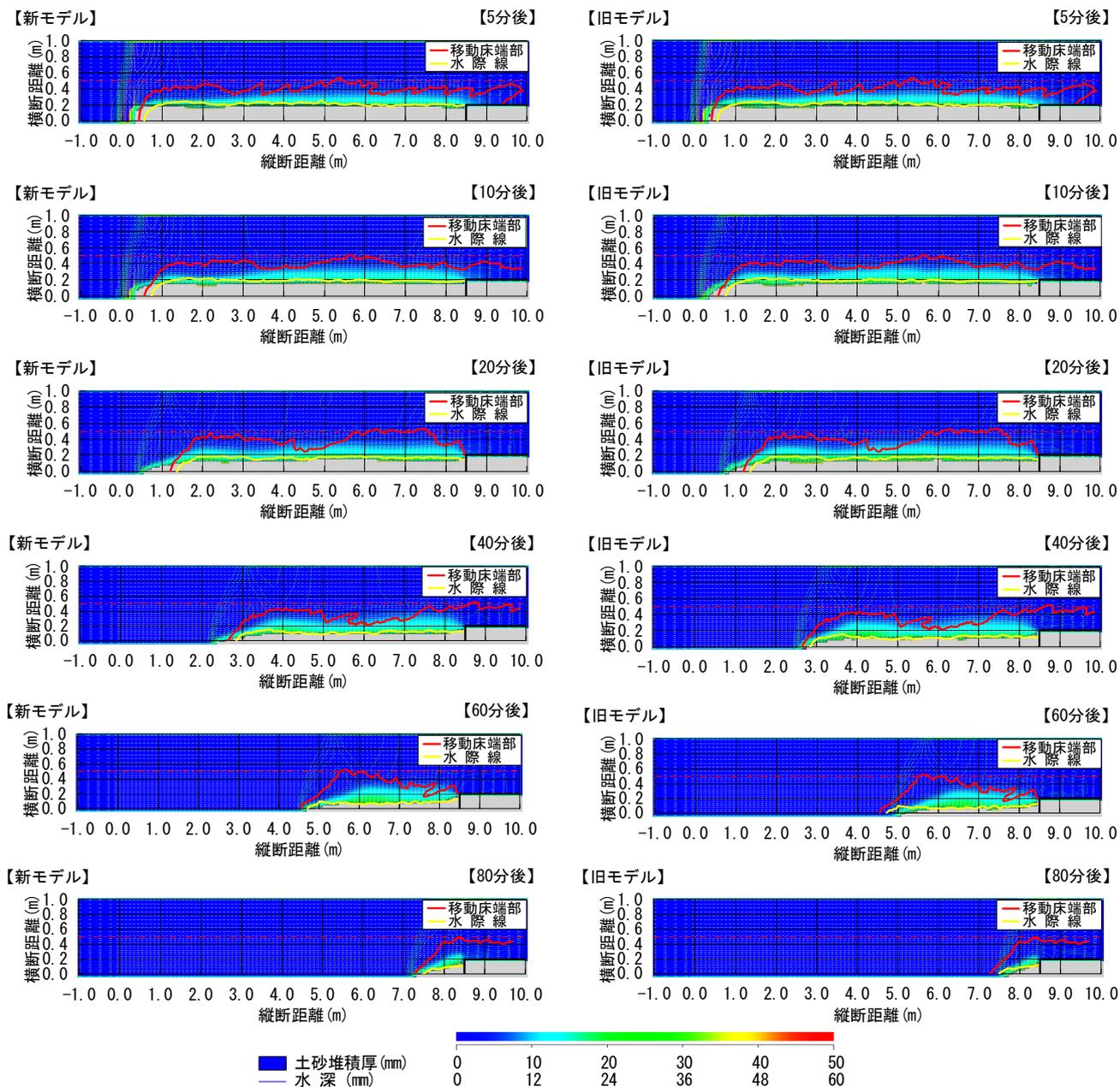


図-4.5 置土平面形状の時系列変化

当該計算は、粒径 1.2mm と比較的大きい粒径を用いた実験であることから、掃流砂のみを考慮した旧モデルと大きな差が生じなかったものと推測される。

図-4.5 は置土の平面形状の時系列変化を示したものである。図中の太い実線は実験結果を示しており、黄色が水際線、赤色が移動小領域の外縁を意味している。計算結果については、図中の矢印で流速、色で置土の堆積厚、細い実線で水深を示した。実験結果と計算結果では、新旧モデルとも 20 分までの置土先端の侵食がやや遅れているが、後半の形状はほぼ一致しており、移動床の拡がりについても概ね一致している。また、新モデル、旧モデルとの平面形状は概ね一致している。

以上の結果から、置土先端部の流水の衝突による影響の再現においては旧モデル同様課題が残るが、混合粒径および浮遊砂の輸送を取り扱えるように改良した新モデルの動作については良好である。

### 4.3 現地スケール現象への適用

#### 4.3.1 計算条件

計算条件を設定するにあたっては、三春ダムにおいて 2007 年 10 月 9 日のリフレッシュ放流時に試験的に実施されている置土の現地観測データをもとに行った。(詳細は、「14.7 貯水池下流供給土砂の高精度制御に関する研究 2. 置土侵食の現地観測」参照。)

観測項目は、河川流量(ダム放流量)、置土上流、中央および下流の河川水位、表面流速、置土侵食形状、フラッシュ放流後の横断地形、置土材料の粒度分布である。図-4.6 に各項目の観測位置を示す。

計算モデルは、図-4.7 に示すように、断面データが得られている置土上流 70m から下流 200m までの領域とし、計算格子は、流下方向に 2m×135 個、横断方向に 2m×20 個設定した。また、交換層厚は 30mm、粒度分布を記憶する層厚は 60mm とし、計算時間間隔は 0.005 秒とした。境界条件については、上流端に流量、下流端に水位を与え、

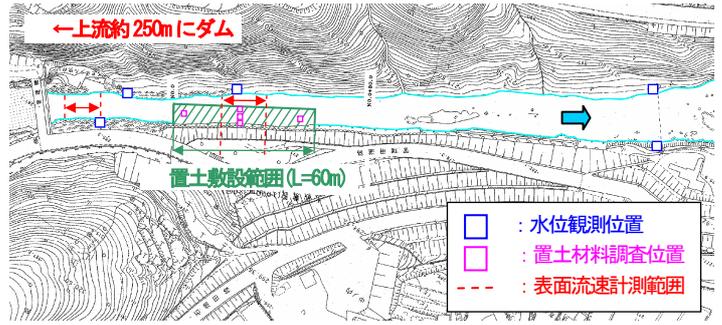


図-4.6 各項目観測位置

表-4.1 各ケースにおける粒径とその構成割合

	粒径 (mm)	構成割合 (%)		粒径 (mm)	構成割合 (%)
Case-1					
代表粒径	0.50	100.0	-----	-----	-----
Case-2					
代表粒径1	12.39	0.8	代表粒径5	0.60	27.2
代表粒径2	6.72	1.3	代表粒径6	0.33	15.1
代表粒径3	3.08	8.2	代表粒径7	0.16	13.4
代表粒径4	1.30	18.8	代表粒径8	0.09	15.2

マンニングの粗度係数は 0.03 とした。なお、計算範囲の下流端水位は、現地の河床勾配が概ね 1/2000 であることから、同勾配を用い算出した。

#### 4.3.2 計算ケース

計算は粒度のモデル化の影響を検討するために、現地観測によって得られた置土材料の粒度分布をもとに、単一粒径 (Case-1) と代表粒径を 8 個設定した混合粒径 (Case-2) について行った。各ケースの代表粒径は、Case-1 で  $D_{50}$  値、Case-2 においては、ふるいごとに 8 段階に区分された各区分の平均値である。表-4.1 に各ケースの粒径とその構成割合を示す。

#### 4.3.3 解析結果

図-4.8 は、置土の平面形状の 2 時間後 (最大流量時) (図-4.11 参照) と 6 時間後 (現地観測終了時) の変化を示したものである。図中の太い黄色の実線は観測結果の水際線を示している。計算結果については、図中の矢印

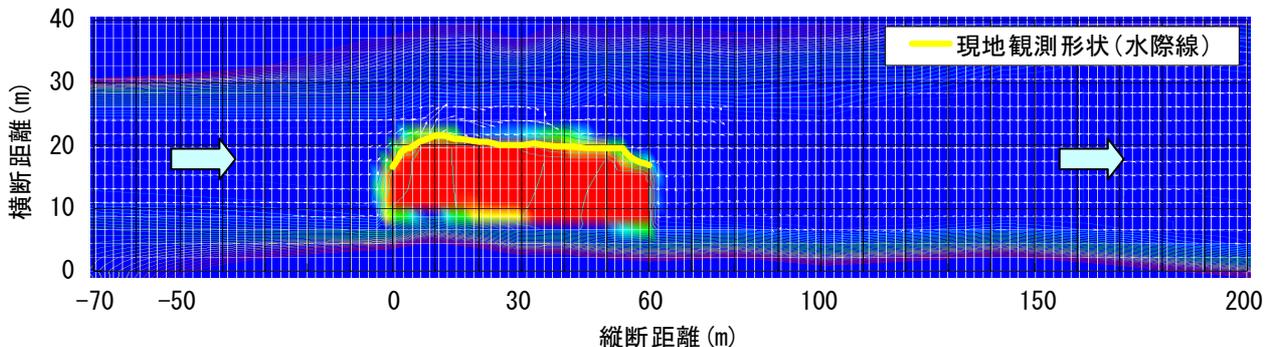


図-4.7 計算モデル (三春ダム下流河川)

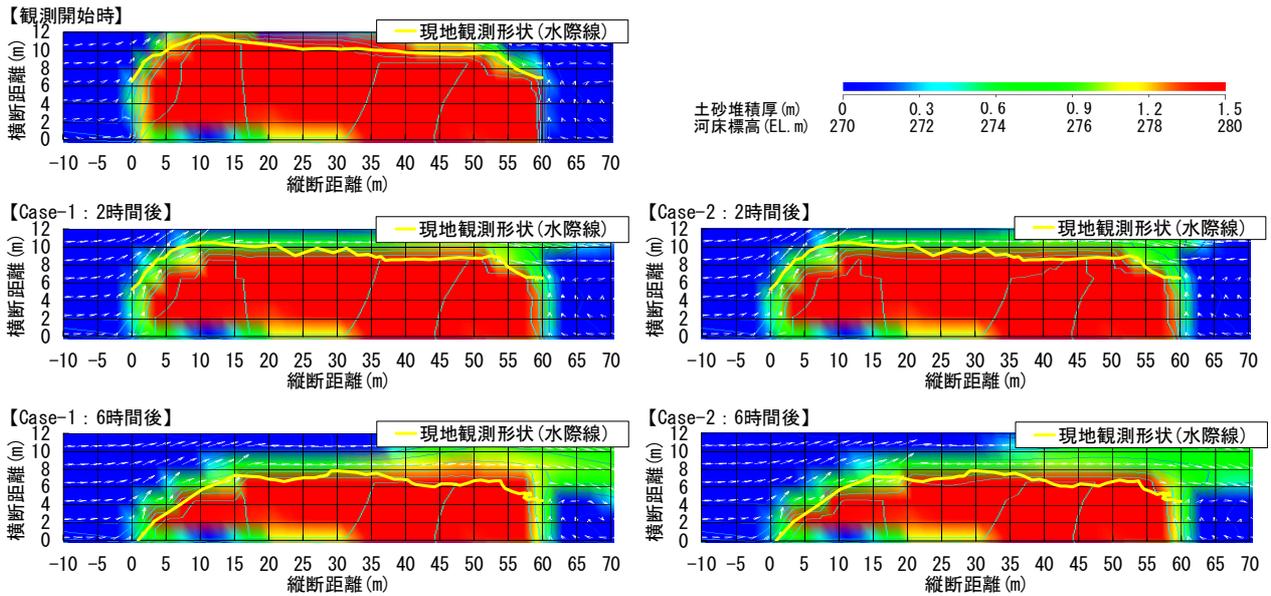


図-4.8 置土平面形状の時系列変化

で流速、色で置土の堆積厚、細い実線で置土を含めた河床標高を示した。2時間後の形状では、Case-1とCase-2では大きな違いは認められないが、現地観測結果と計算結果では、後者のほうが先端0m~10m付近の侵食が若干進んでいる。さらに、6時間後の形状においては、Case-2のほうがCase-1に比して0m~20m付近の侵食が進む結果となった。

現地観測形状において置土先端から40m付近より下流部の侵食がやや進んでいるが、これは、小流量時に置土が侵食されて濁水が発生しないよう設置された巨石が原因であると考えられる。なお、計算モデルではこれを考慮していない。

図-4.9は、最大流量時と現地観測終了時の現地観測および計算結果の縦断分布である。観測開始時においては、置土上下流部の水位、流速はともにほぼ一致しているが、置土中央部においては、水位、流速ともに若干小さくなる結果となった。この原因として、置土設置時期との関係から精度のよい横断地形データが得られなかったことや、局所的な河道の変化、巨石の存在等、河道形状の再現性の精度が影響しているものと考えられる。以後、最大流量時および現地観測終了時においても同様の傾向がみられる。

図-4.10は、現地観測終了時の横断形状の観測値と計算値の比較である。図中の「現地置き土形状」と「モデル置き土形状」はリフレッシュ放流前の置土形状の現地観測値と計算用にモデル化した地形を表している。両者の河床形状を比較すると、置土上流端より20mまでの区

間においては、平面図同様、現地観測結果に比して計算結果の侵食がやや進んでいる結果となっている。なお、置土上流端より40mおよび置土下流端においては概ね再現されている。

図-4.11は、河川流量および侵食土砂量をそれぞれ時系列で示し、侵食土砂量においては、現地観測値と計算結果を比較したものである。計算の侵食土砂量は、計算開始時に置土が設置されていた範囲の変化量を算出したものである。Case-1、Case-2ともに現地観測開始後2時間程度までは現地観測結果と大きな差はないが、河川流量が最大付近に達した後は、Case-1に比してCase-2のほうが現地観測値に近い値になっている。

また、現地観測結果で流量がピークに達してから侵食量が一時的に増加する傾向がみられるが、計算結果においても特にCase-2にその傾向が再現されている。なお、現地観測における土砂の算定は、図-4.8に示した水際線の面積変化量(30分間隔)に平均的な置土堆積厚である1.5mを乗じて算出しているが、現地では水際線より外側にも置土材料が確認されたため、上述した40m以降の侵食増加量も含め、実際の侵食量はより小さい可能性がある。

図-4.12は、6時間後における計算結果の平面形状の全体図である。これに関しては、置土下流での土砂堆積状況の現地観測が行われていないため比較することはできなかったが、Case-1とCase-2において、100mより下流域で堆積厚に違いがみられた。

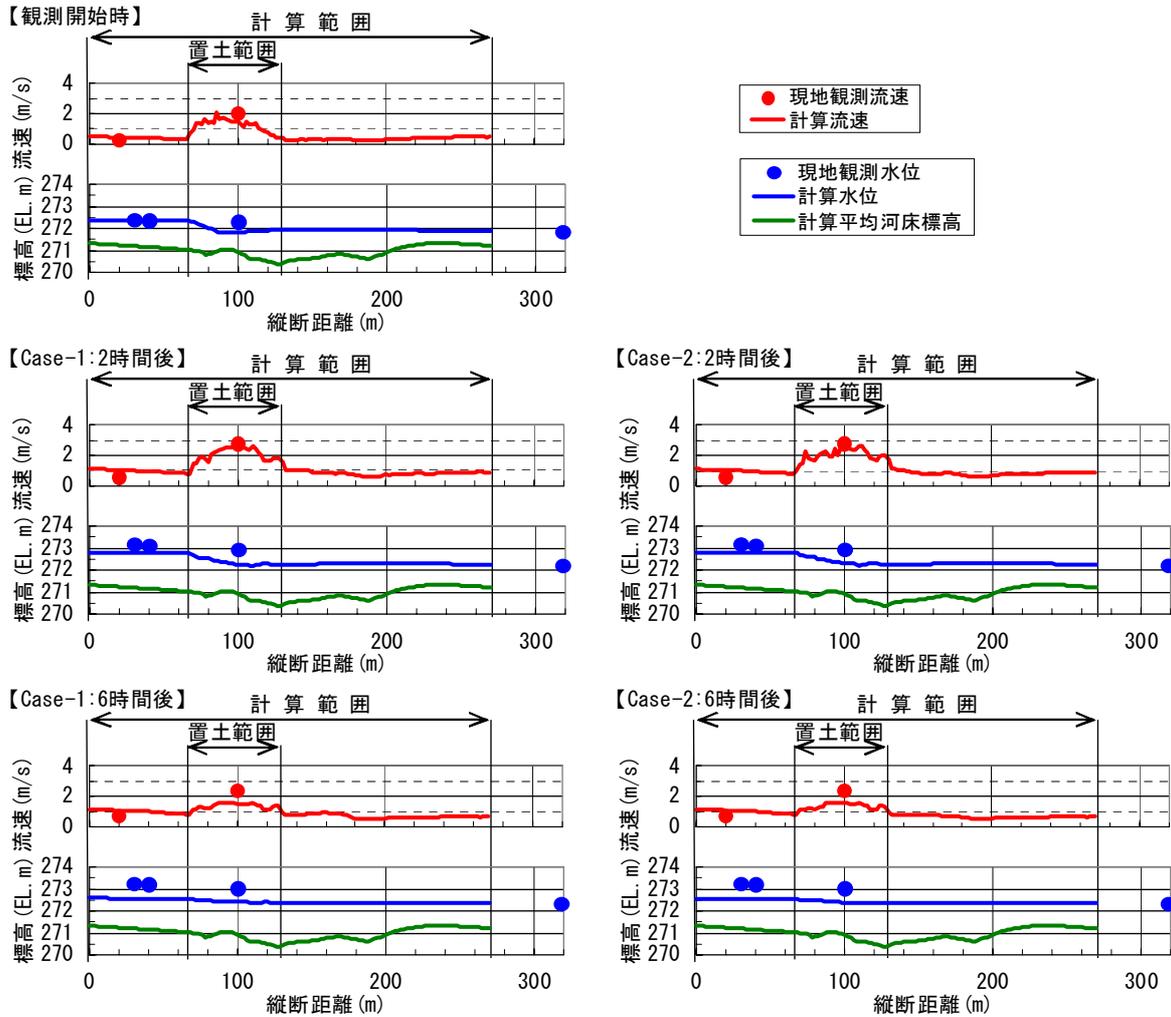


図-4.9 現地観測結果と計算結果の縦断分布

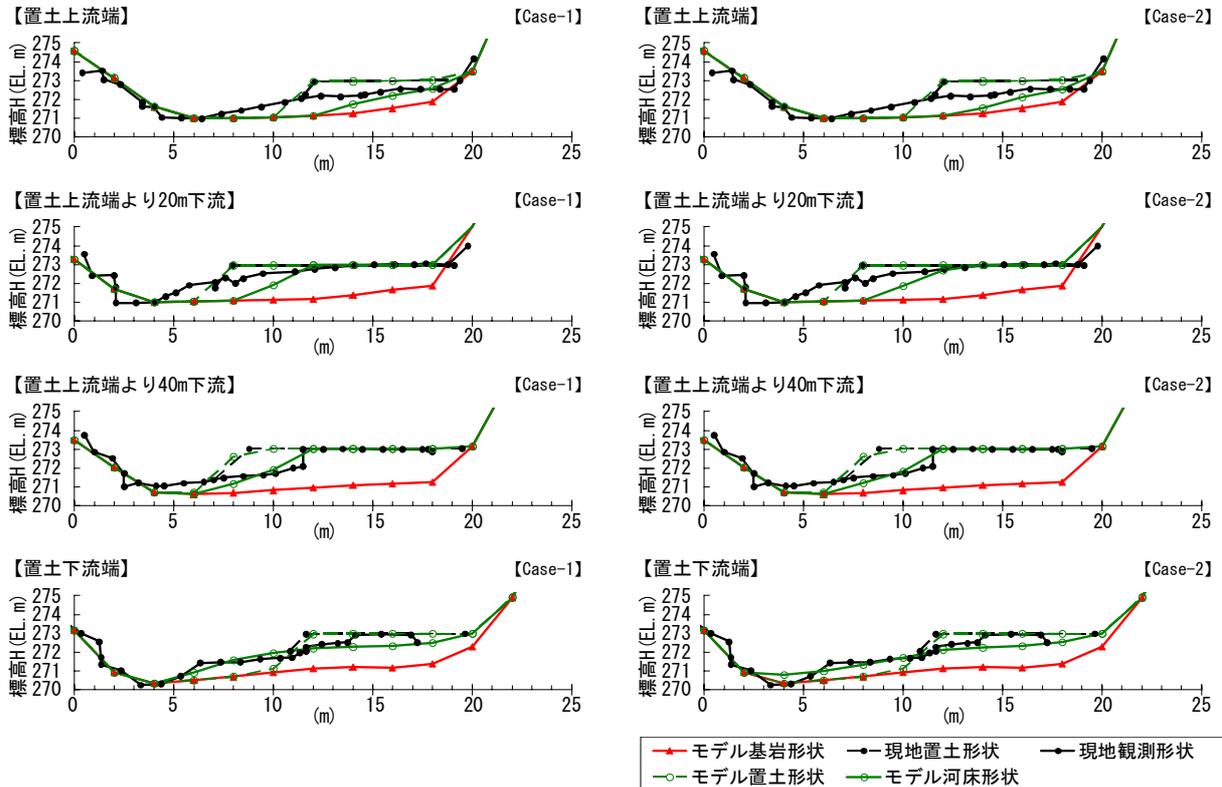


図-4.10 観測終了時(6時間後)の横断形状

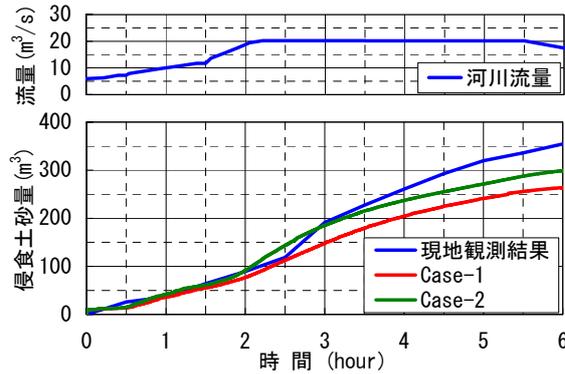
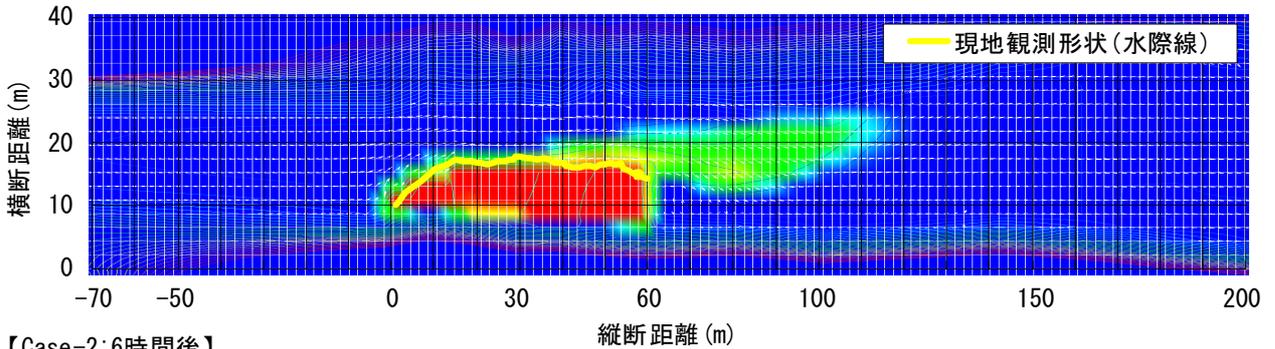


図-4.11 河川流量と置土侵食土砂量

【Case-1:6時間後】



【Case-2:6時間後】

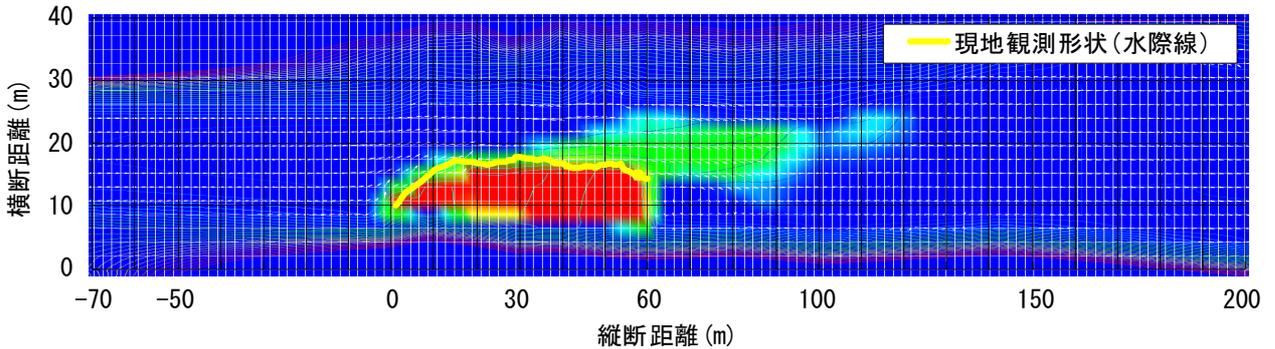


図-4.12 6時間後における置土平面形状

## 5. 下久保ダム上流における土砂移動特性に関する調査

### 5.1 調査対象

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、明確な議論ができないことが多かった。そこで、粒径別流入土砂量の算定が現在進められつつある表-5.1のダムについて事前に現地踏査を行った(18年度)。主に目視による調査結果を表-5.1に整理した。また、特徴的な河川景観を図-5.1に示す。調査結果から、アクセスが容易で、露岩も見られ、人口構造物の少ない下久保ダムを詳細な調査対象として選択した。

19年度は、この調査結果に基づいて、下久保ダム上流区間で河床形態および河床材料の調査を行うこととした。ここで上流区間に着目したのは、ダムの影響がない状態での山地河道の特性を把握することを狙ったものであるが、下流区間については独立行政法人水資源機構下久保ダム管理所によって継続的に河床形態、河床材料の調査が行われている。

図-5.2に調査対象位置図を示す。下久保ダムは、堤高129m、総貯水池容量1億3千万 $m^3$ 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1968年に建設された。図中の丸印は事前の踏査で現地の写真撮影、河

表-5.1 事前踏査を実施したダムおよび踏査結果

ダム名	下久保ダム	菌原ダム	佐久間ダム	美和ダム	土師ダム	大渡ダム	早明浦ダム	緑川ダム
地域	関東	関東	中部	中部	中国	四国	四国	九州
河川名	利根川水系 神流川	利根川水系 片品川	天竜川	天竜川水系 三峰川	江の川	仁淀川	吉野川	緑川
調査 範囲	背水区間～ 10km	老神溪谷～ 吹割溪谷 約4km	水神橋～平 岡ダム 約3km	貯砂ダム～ 岩入地区 約3km	背水上流端 ～藤原地区 約7km	休場地区～ 堤地区 約8km	小金滝橋～ 大橋ダム 約6km	内大臣川発 電所～笹原 川合流点上 流1km 約2km
川幅	30m	70m	50m～130m	30m～120m	30m	30m	50m	20m
河床 勾配	1/110	1/100	1/1100	1/80	1/350	1/80	1/50	1/70
平均 粒径	約20mm	約30mm	20mm	30～50mm	10mm	50mm	30mm	10mm
最大 粒径	約1000mm	約500mm	400mm	1500mm	400mm	3000mm	3000mm	4000mm
滞筋	蛇行	直線(固定)	蛇行	蛇行	蛇行(固定) 一部平坦	蛇行	蛇行	蛇行
砂州	有り(植生無 し)	有り(植生有 り)	有り(一部区 間のみ)	有り(網目 状)(200～ 300m)	有り(植生有 り)(200～ 300m)	有り	有り	有り
瀬淵	有り(Bb型)	無し	無し	有り(Aa型)	有り(Bb型)	有り(Bb型)	有り(Bb型)	有り(Bb型)
露岩	有り	無し	無し	無し	有り(上流区 間のみ)	有り	有り	無し
浮石	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り
人工構造物	無し(貯砂ダ ムあり)	床固め工有 り	平岡ダム	有り(影響は 小さい)	取水堰5基程 度あり	発電用取水 堰5～6基	発電用取水 堰H=20m	無し
アク セス	容易	容易	3橋からの 容易	容易	容易, 現場 への移動が 困難	困難	困難	困難

※砂州欄の数値は砂州の蛇行波長、浮石欄は浮石およびはまり石の有無。

床状況、瀬淵構造等を調概略査した箇所である。詳細な調査区間は、貯水池末端やや上流の柏木地区を始点として、約8km上流の大井戸地区までである。

## 5.2 調査方法

調査に先立って、下久保ダム上流河道の変化を把握するため、過去に撮影された2時期の空中写真を用いて、調査区間の河道標高を推定した。調査区間では、過去に10回程度空中写真が撮影されているが、ダム建設前の1963年4月および2002年9月に撮影された空中写真および1/25,000地形図を用いて、河道標高を推定した。推定にあたって、空中写真上で明確な地点を10箇所特定し、現地でGPSによる基準点観測を実施した。観測結果の誤差は水平方向0.063m～0.081m、鉛直方向0.182mであった。この観測結果に基づいて、デジタル図化機で立体画像を作成し、河道に沿って横断測線を約50m間隔で設け、測線上の標高を読み取った。読み取りは、それぞれの点で2回実施し、測定較差が0.4m以上の場合には再度読み

取りを行った。

河床材料調査は、河床表層の材料を対象として基本的に面積格子法によって実施した。図-5.3に示すように、1m×1m方形枠を河床に設置し、写真撮影を行うとともに、0.1m格子の縦線と横線が交差する位置で表層にある河床材料の長径、中間径、短径を計測・記録した。その際、粒径が大きくサンプル数が不足する場合には、方形枠を追加して、合計で50個以上のサンプルを確保するようにした。また、表層に細かい河床材料が堆積する場所で、最大の粒径が4mm以下の場合には平面採取法によってサンプルを採取し、ふるい分け試験によって粒径加積曲線を作成した。図-5.4は調査測線を示す。空中写真測量の際に設定した横断測線から1km間隔の測線を基本としたが、近傍の人工構造物の影響が見られる断面、将来的に同一地点での調査が困難な断面については適宜移動させ、左岸、流心(水際)、右岸の3箇所調査を実施した。また、山地河道に特徴的に見られる巨石(直径1m以上)周辺の河床材料を調査するため、図-5.4に矢印で示す



下久保ダム上流（貯水池末端，上流を望む）



菌原ダム上流（取水堰直下、下流を望む）



佐久間ダム上流（右岸から天竜川橋を望む）



美和ダム上流（黒川合流点堰堤付近，上流を望む）



土師ダム上流（川井大橋上流 500m，下流を望む）



大渡ダム上流（柳谷役場付近，下流を望む）



早明浦ダム上流（日ノ浦地区，下流を望む）



緑川ダム上流（鮎の瀬大橋より上流を望む）

図-5.1 典型的な河川景観



0.5km 断面付近および 4.5km 断面付近の 2 箇所の巨石の上流側、下流側および側面で河床材料調査を実施した。図-5.5 は、巨石周辺を撮影した写真である。

### 5.3 調査結果

図-5.6 は、河道の標高推定によって得られた 0km、3km、6km、8km 断面の横断形状の変化を表す。河床が平坦な部



図-5.5 巨石周辺の礫の分布状況

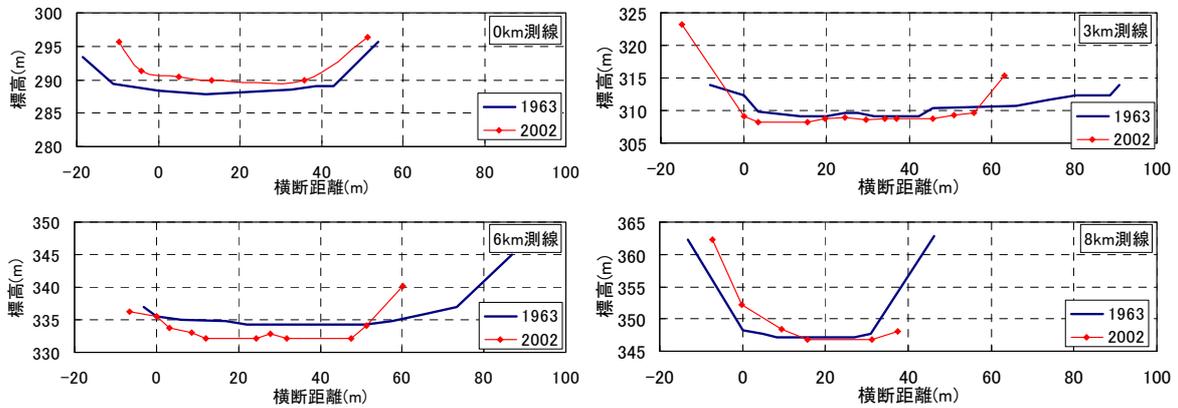


図-5.6 空中写真から標高を推定した断面形 (0km、3km、6km、

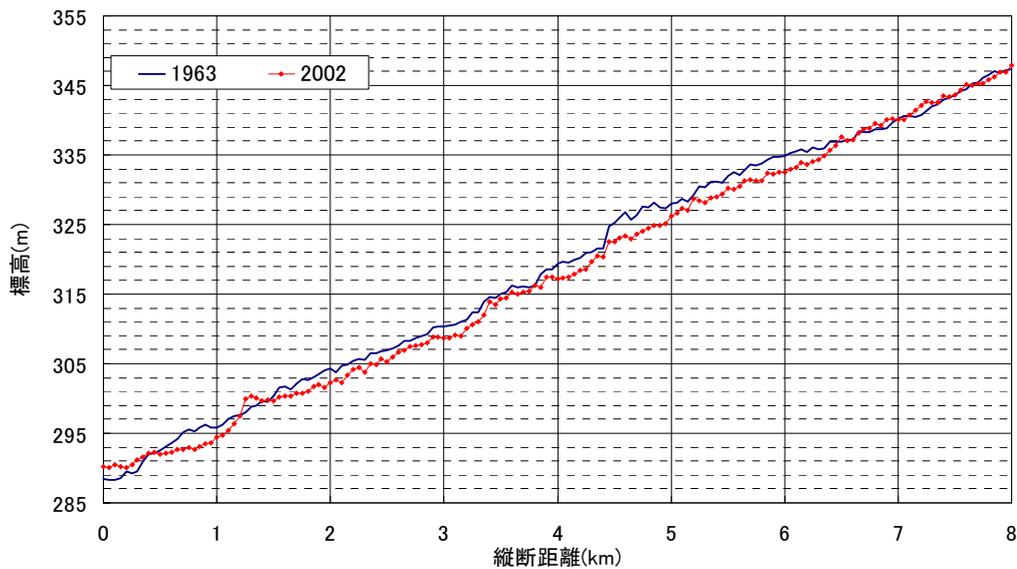


図-5.7 河道縦断面の変化

分は水面であり、水面下の河床形状を確認することができていないため、深掘れ部等が再現されておらず、山地河道としては平坦な横断形となっているように見える。沿川の道路整備等に伴って川幅が減少傾向にあり、事前踏査で川幅が30m程度と判断されていたが、40mから60m程度であることが確認された。図-5.7は平均河床高の縦断分布である。平均河床高の算定にあたっては、上述の水域部分も含めて平均河床高としたが、当該区間がダ

ム上流部に位置し、1968年と2002年で平水時の流量に大きな差がないこと、写真上で見た水面幅が川幅の半分以下であることから、河床変動（河床高の差）を考える上では上記の算定に特段の問題はないと判断した。一部の区間を除き、ほぼ全区間で顕著な河床低下が生じており、最大で3.5mも低下している箇所も確認できる。また、当該区間で河床勾配に大きな変化はなく、1/140程度であることも確認された。

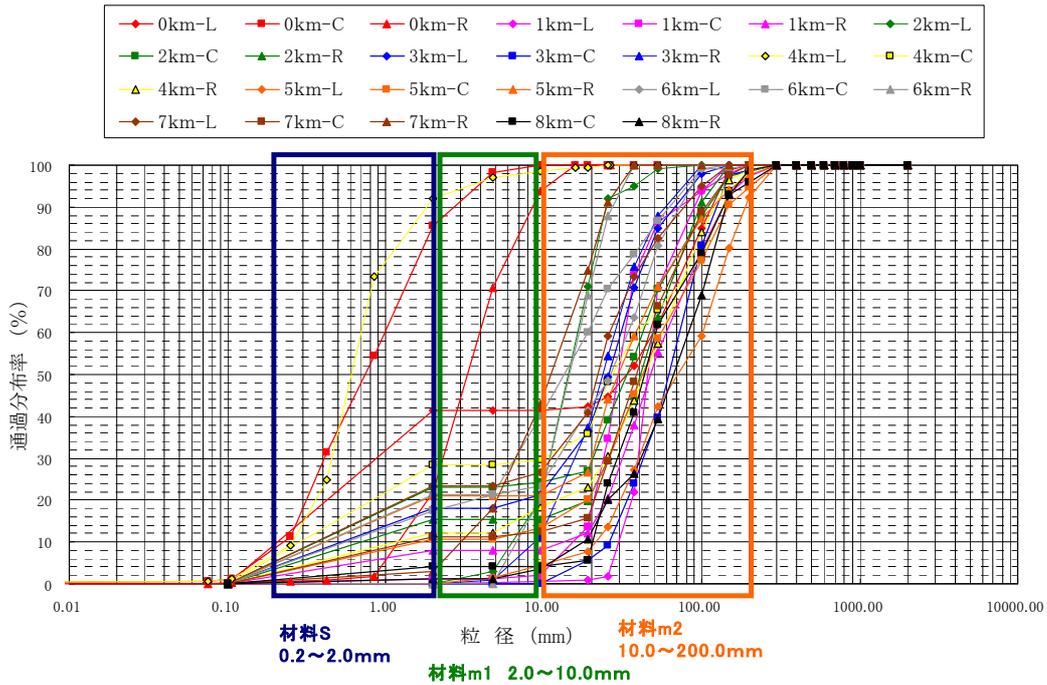


図-5.8 測線上での粒度調査結果

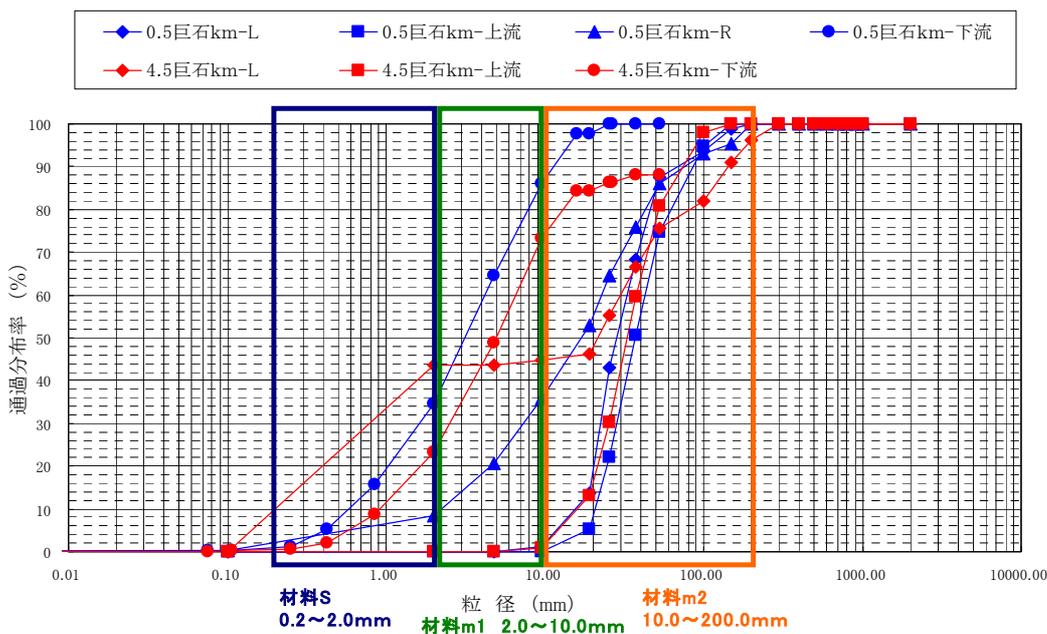


図-5.9 巨石周辺での粒度調査結果

図-5.8 に、それぞれの測線で調査した河床材料の粒度分析結果を重ねて示す。参考資料<sup>4)</sup>で提案されているように、河床材料を主材料 m、ここでは礫、副材料 s、ここでは砂に分けることができる。なお、材料 m の粒径の幅が広く、材料 m2 として粒径 10mm~200mm の材料、材料 m1 として粒径 2mm~10mm の材料を、材料 s として粒径 0.2mm~2mm の材料を対応付けることができる。ここで、材料 m1 が卓越する箇所は、0km 右岸であり、調査時に撮影された写真を見ると、右岸側に露出した岩盤が河道内に突出した場所の背後に堆積した材料であった。また、材料 s は調査時には水没した部分で確認される場合もあったが、中州状の箇所に堆積した材料であった。図-5.9 は巨石周辺の河床材料調査結果である。巨石の上流側および側面は材料 m2 とほぼ同じ粒度分布を示すが、下流側では材料 m1 が卓越した粒度分布となる。また、4.5km 巨石左岸で材料 s が卓越するのは、湾曲部内岸側に位置し、固定砂州の形成箇所に堆積した河床材料であったためである。図-5.8 の調査結果と合わせて考えると、材料 m1 は巨石下流側などの遮蔽域に多く存在する材料であり、基本的には材料 m2 および材料 s がよく見られる河道と言えらる。

#### 5.4 平成 19 年台風 9 号に伴う洪水について

2007 年 9 月 7 日、台風 9 号に伴う洪水は、下久保ダム管理開始 (1968 年 1 月) 以来、最大級の洪水を記録した。流域平均降水量は 417mm を観測し、最大流入量は約 1,480 m<sup>3</sup>/s (計画最大流入量 2,000 m<sup>3</sup>/s)、総流出量は約 97,000,000 m<sup>3</sup>、洪水期の貯水容量 85,000,000 m<sup>3</sup> を上回る大規模なものであった。下久保ダムでは、最大流入量発生時における放流量を 524 m<sup>3</sup>/s に軽減し、約 956 m<sup>3</sup>/s の洪水調節を行うとともに、約 21,600,000 m<sup>3</sup> を一時的に貯留した<sup>5)</sup>。

上記の河床材料調査結果は出水後の 2008 年 1 月の調査結果であり、通常時の粒度分布と異なる可能性もある。また、瀬淵構造も通常時に形成される形態と異なることも考えられる。2007 年 9 月 7 日の出水は規模が大きかったため、その後の河道調査の一環として空中写真が撮影されている。現在、上述した空中写真測量によって、出水後の河床高を計測している。また、上述した 2 時期および出水後の航空写真から瀬淵分布の変化を読み取っている。現在、これらのデータを取りまとめ中であり、20 年度の調査計画に反映させる予定である。

#### 6. まとめと今後の課題

微細粒子土砂の沈降速度の分析方法に関して、沈降筒実験における実験条件の設定方法について検討した結果以下の知見が得られた。

- 1) 長さ 2m の沈降筒では、沈降距離を十分確保するために、底部から 0.5m~1.0m 付近での SS 測定が適切である。
- 2) 沈降塔の規模については  $\phi$ 200mm~400mm 程度が必要である。

今後は、沈降筒実験に適した採水方法、模擬濁水の製造方法について検討を行っていききたい。

微細粒子土砂の侵食が発生する限界と侵食速度やそのばらつきを把握するため、ダム貯水池堆積土砂を含む 4 種類の土砂を用いて水理模型実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 3) 4 種類の土砂について、侵食が進展する状況を把握し、煙状の侵食が始まる状態 (侵食状態 I) と局所的な激しい侵食が始まる状態 (侵食状態 II) の侵食限界摩擦速度を求めた。土砂によっては、侵食状態 II が明瞭でない場合もあり、侵食状況は土砂の種類や含水比の条件によって特色が認められる。
- 4) 4 種類の土砂について、侵食速度を把握した。粒度の小さい T.A カオリンと大きい真名川ダムの土砂ではばらつきの小さい結果が得られ、中間的な粒度の美和ダムと鯖石川ダムの土砂ではばらつきが大きい結果が得られた。
- 5) T.A カオリンの侵食速度については、既往の研究と同様な結果が得られた。
- 6) 鯖石川ダムの土砂について、実験水路の幅の違いによる結果を比較したところ、幅の広い 60cm の方が侵食速度のばらつきの下限が小さい傾向が見られたが、上限値の相違は小さかった。
- 7) 侵食速度の結果のばらつきが大きい土砂は、局所的な深掘れ等の不均一な侵食状況を示す。

平面 2 次元河床変動モデルについて既往のモデル改良後の動作検証として、置土の水理模型実験を行い新旧モデルの比較を行った。さらに、現地スケールの置土侵食現象への適用を試みた。その結果以下の知見が得られた。

- 8) 置土実験に改良後の新モデルを適用した結果、実験結果と計算結果における流下土砂量、平面形状の進展は概ね一致していた。また、掃流砂のみを扱う一様粒径モデルの結果との比較において概ね一致した。課題

が残る部分もあるが、新モデルの動作については良好である。

9) 新モデルで、三春ダム下流の置土侵食の現地観測結果について、一様粒径と混合粒径(8 粒径)の2つの条件で計算を行ったところ、両者とも観測結果の侵食量や置土形状を概ね定量的に再現することができた。

10) 一様粒径と混合粒径(8 粒径)の結果を比較すると、混合粒径とした方が侵食量は多くなり、侵食量の変化の傾向は現地観測により近い結果となった。

今後は、粒径の小さな置土水理模型実験結果を用いて浮遊砂モデル導入の効果を検証したい。また、現地スケール現象への適用においては、計算事例を増やし、再現性の向上を図るとともに置土計画への反映を行っていきたい。

下久保ダム末端部上流の約8km 区間を対象として、空中写真測量および河床材料調査を行った。その結果、以下のことが確認された。

11) ダム建設以前の1963年から2002年にかけて、河床は低下傾向にあり、最大で3.5mも低下した箇所もあった。また、当該区間の河床勾配はほぼ一様で1/140程度、川幅は50m~70mである。河床勾配は、この40年で大きな変化は見られなかったが、川幅は周辺の道路整備等によって縮小傾向である。

12) 当該区間の河床材料は、河床の主構成材料である粒径10mm~200mmの礫(材料m2)、砂州等に堆積する粒径0.2mm~2mmの砂(材料s)で主に構成される。直径1m程度の巨石下流側、河岸の張り出した岩盤の下流側などの遮蔽部では、材料m2と材料sの中間的な材料である材料m1(粒径2mm~10mm)が卓越する。

2007年9月7日に生じた出水の規模が大きかったため、その後の河道調査の一環として空中写真が撮影されている。現在、出水後のデータを取りまとめ中であり、20年度の調査計画に反映させる予定である。なお、20年度は中小規模の出水を受けた後に同様の調査を実施し、出水の発生状況と地形変化、地形変化と瀬淵分布・河床材料との関係等について解析を進め、山地河道の特徴をより明確にする予定である。

本報告をまとめるにあたり、桂沢ダム・川治ダム・下久保ダムの管理機関の方々にご協力いただき、御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 関根正人:実河川に自然堆積した粘着性土の侵食機構の解明と現地侵食試験法に関する研究、科学研究費補助金研究成果報告書、2004.3
- 2) (独)土木研究所:平成18年度重点プロジェクト研究報告書、pp.708-723、2007.3
- 3) 鎌田昌行・柏井条介・櫻井寿之:ダム下流河道仮置き土砂侵食実験の平面2次元河床変動解析、土木学会第61回年次学術講演会講演概要集 第2部、pp.487-488、2006
- 4) 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。
- 5) 下久保ダム管理所記者発表資料:下久保ダム貯水池(神流湖)の濁りに関するお知らせ(平成19年9月20日10時)、<http://www.simokubo.com/>。

## 【英文要旨】

**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 2007, following items were conducted: investigation on settling and erosion condition for fine sediment, verification of improved plane two-dimensional river bed movable simulation model using physical model tests data and field observed data, field investigation on upstream area of Shimokubo dam reservoir for inspecting sediment transport characteristics. As a result, the appropriate water sampling position and settling cylinder shape for the settling test were proposed. The erosion characteristics of fine sediment were revealed and an erosion rate test method was proposed from the results of erosion test of four kinds of fine sediment. It was confirmed that the improved plane two-dimensional model could simulate the field observed replaced sediment erosion phenomena quantitatively. Furthermore, by means of field investigation of Shimokubo dam, transition of river bed forms and present situation of bed material were understood.

**Key words:** dam reservoir, sediment transport, fine sediment, settling velocity, erosion rate, plane two-dimensional river bed movable model