

洪水後の河道堆積土砂量分布に基づく 上流端境界条件としての 流入土砂量ハイドログラフの推算

ESTIMATION OF THE SEDIMENT HYDROGRAPHS
AS THE UPSTREAM BOUNDARY CONDITION BASED ON THE SEDIMENT
DISTRIBUTION AFTER THE FLOOD IN THE RIVER

岡山士朗¹・内藤ゆう子²・福岡捷二³
Shiro OKAYAMA, Yuko NAITO and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士後期課程
(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

²非会員 国土交通省関東地方整備局 甲府河川国道事務所 調査第一課 課長
(〒400-8578 山梨県甲府市緑が丘一丁目10-1)

³フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

It is important to estimate the inflowing sediment hydrographs of each particle size, which give the boundary condition of the upstream end in order to analyze the large bed variation due to flood flow accompanied by a large amount of sediment inflow. In this study, the estimation of the sediment hydrograph at the upstream end of the Kamanashi River was attempted so as to reproduce the measured sediment deposition distribution and the distribution of flood marks using the quasi-steady one-dimensional flood flow and bed variation analysis. An analysis method developed here was applied for understanding of the mechanism of bed variation and the variation of the grain size distributions in the lower reach of the Kamanashi River in which a large amount of sediment deposition was observed.

Key Words : *sediment hydrograph, upstream boundary condition, Kamanashi River, flood flow, bed variation*

1. 序論

釜無川昭和57年8月洪水では、豪雨により上流山地流域から大量の土砂が河道に流入、堆積し、著しい河床上昇をもたらした。土砂堆積に伴い主流路が変化することで、多くの場所で河岸侵食被害が生じた。このような大量の土砂流入を伴う洪水は、流下能力の低下による氾濫の危険性や河岸侵食による堤防破壊のリスクを高めるため、土砂堆積機構の実態を明らかにする必要がある。その有力な手段として洪水流・河床変動解析が挙げられる。河床変動は主に上流側から決まる現象であるため、上流端に土砂の境界条件を与えて河床変動の方程式を解くことになる。従来の方法では、境界で平衡流砂量を与えることが多いが、これは、上流端での土砂移動状態が明らかでないための便法であり、河床変動解析の信頼性を低下させることになる。近年、上流からの大量の土砂移動

が災害の発生原因となっている事例が多く見られ、これらに対する信頼度を持った解析方法の確立が重要な課題となっている。

この課題に対して近年、山地領域では、降雨と地形条件を与えることで、山地から流出し河道に流入するまでの土砂動態が計算されるようになってきた。しかし、この解析法は、土砂生産や土砂供給、溪流での土砂輸送・堆積の解析精度に依存しており、これらの現象には未だ未解明な部分が多いことから、この方法を土砂流出の多い中・下流河川の洪水流・河床変動解析の上流端境界条件に用いるのは適当ではない。

一方、河川領域では、上流山地から大量の土砂流入が生じた姫川平成7年7月大洪水を対象に、岡安ら³⁾は、下流河道の観測水面形の時系列変化や痕跡水位、洪水後の平均河床高、流路変動を再現するよう洪水流・河床変動解析を行うことで、上流端での流入土砂量ハイドログラ

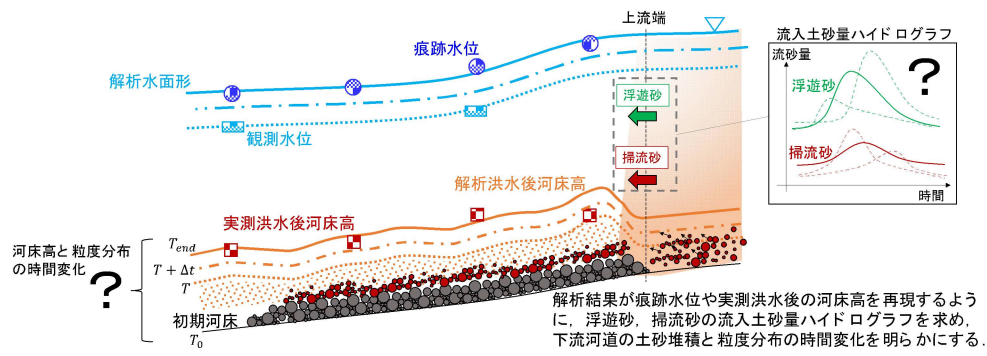


図-1 流入土砂量ハイドログラフの推定方法と河床変動機構検討の概略イメージ

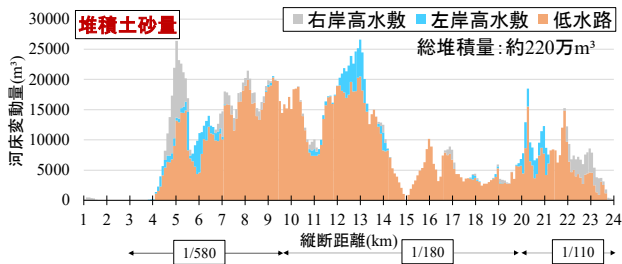


図-2 堆積土砂量の縦断分布

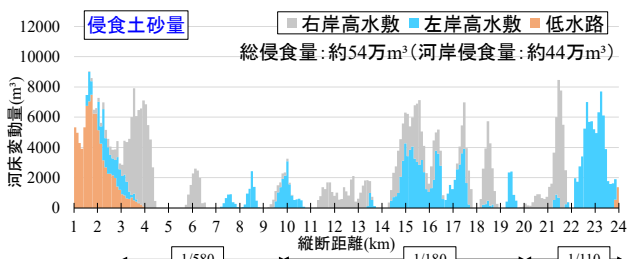


図-3 侵食土砂量の縦断分布

を推定している。しかし、姫川の解析では流入土砂の粒度分布については十分考慮されておらず、姫川の解析法をそのまま他の河川に適用するには課題を残している。

本稿では、大量の土砂流入を伴う釜無川昭和57年8月洪水時の河床変動機構を明らかにするため、洪水後の下流区間の土砂堆積状況に着目し、土砂の上流端境界条件である各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフを推定した。そして、推定した流入土砂量ハイドログラフを用いて、本洪水の土砂堆積機構を考察した。

2. 流入土砂量ハイドログラフと河床変動機構の

検討方法

(1) 流入土砂量ハイドログラフ推定の考え方

図-1に本研究の概略イメージ図を示す。本研究では、準定常一次元洪水流・河床変動解析を用いて、上流端境界条件である各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフを求め、それを用いて、下流河道の土砂堆積と堆積土砂の粒度分布を検討する。各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフの推定には、岡安ら³⁾の考えに上流端の流入土砂の粒度分布を考慮する。すなわち、下流河川の洪水後の

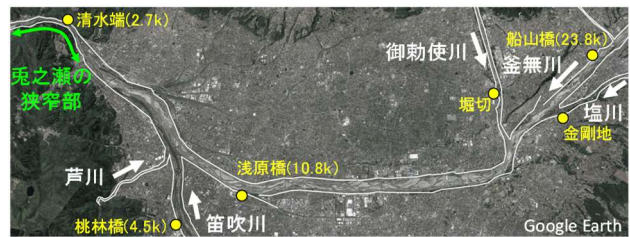


図-4 解析検討区間

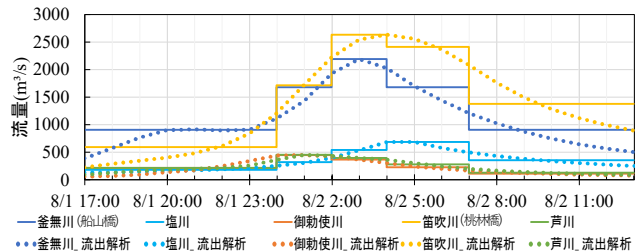


図-5 流量ハイドログラフ

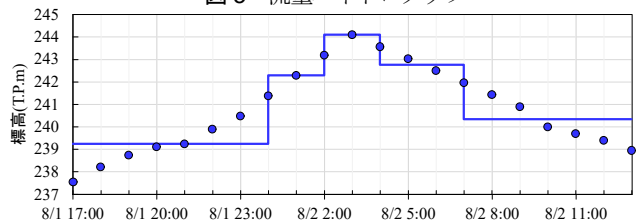


図-6 清水端地点の観測水位ハイドログラフ

実測土砂堆積縦断分布や痕跡水位、土砂の総堆積量などを再現するように各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフを推定する。

図-2、図-3は、それぞれ実測データから算定した釜無川直轄区間の堆積土砂量と侵食土砂量の縦断分布を示す。直轄区間では合わせて約220万m³の土砂が河道に堆積した。

図-4は、解析区間を示す。解析区間は、本川上流端を船山橋(23.8km)、下流端を清水端(2.7km)とし、支川は塩川、御勅使川、笛吹川、芦川を考慮した。

図-5は解析の上流端に与えた流量ハイドログラフ、図-6は下流端に与えた清水端の水位ハイドログラフを示す。流量ハイドログラフは、貯留関数法による流出解析から得られたものを用い、これを簡単のため階段状の準定常流量ハイドログラフとして、各粒径毎の流入土砂量ハイドログラフを検討する。

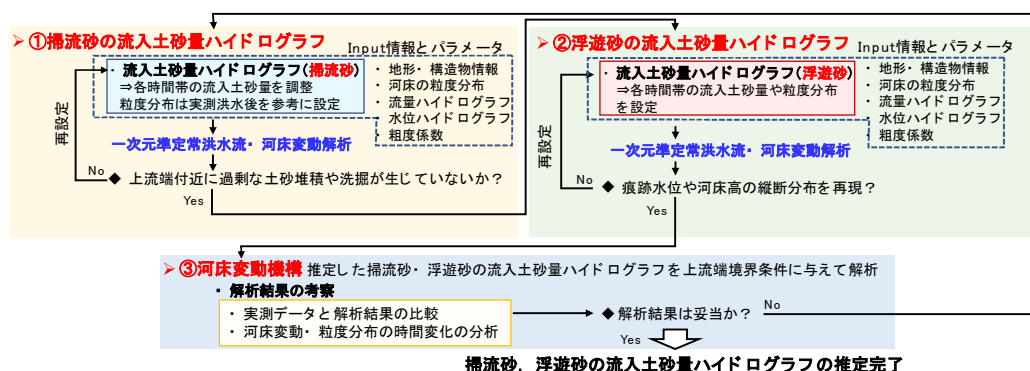


図-7 本研究の流入土砂量ハイドログラフと河床変動機構の検討フロー

(2) 掃流砂の流入土砂量ハイドログラフの推定方法

図-7は、各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフを推定し、河床変動機構や粒度分布の時間変化を検討する一連の流れを示す。まず、流入掃流土砂量ハイドログラフの推定方法を以下に示す。図-8は、掃流砂の流入土砂量ハイドログラフの推定方法を示す。本検討では、流入掃流土砂量を徐々に増加させた解析を繰り返し、上流端付近で実測と異なる過剰な堆積や洗掘が生じないような流入掃流土砂量ハイドログラフを試行錯誤的に推定している。流入土砂量は、表-1に示す条件を検討し、流入掃流土砂量ハイドログラフの波形は、流量ハイドログラフの波形と同一に設定し、粒度分布は、どのケースも同様と仮定した。図-9(a)に検討した流入掃流土砂量ハイドログラフのうちケースbを示す。御勅使川に関しても、表-1に示す条件で同様な検討を行った。

釜無川上流端に流入する掃流砂の粒度は、以下の考えに基づき設定した。崩壊地からの大きな粒径集団は、一洪水水中の土砂輸送距離が短く、検討区間より上流で堆積しやすい。そのため、検討区間に流入する土砂の粒径は、比較的小さい粒径集団が中心と考えられる。また、流量が大きく掃流力が高くなる時間帯ほど粗い粒径が移動することから、流量が大きい時間帯は、流入掃流砂の粒度分布が粗くなるように時間毎に変化させた。各時間帯の流入土砂の粒度分布は、時間帯別に各粒径集団の無次元掃流力を概算し、それぞれの時間帯に輸送可能な粒径を求め、その結果に応じて粒径割合を調節し、図-10(a)で与えた。

御勅使川の流入掃流砂の粒度分布に関しても釜無川と同様の考えに基づき、釜無川の洪水後の粒度分布を参考に、流量に応じて時間的に2種類の粒度分布を与えた。各時間の粒度分布を図-10(b)に示す。ここで、釜無川の粒度分布を参考に与えた理由は、御勅使川の昭和57年8月洪水後の実測粒度分布が無かったためである。

(3) 浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフの推定方法

次に、浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフの推定方法を示す。洪水後の下流河道の河床表面には、細かい粒径の土砂が大量に堆積していた。このことを考慮し、浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフについては、下流区間の

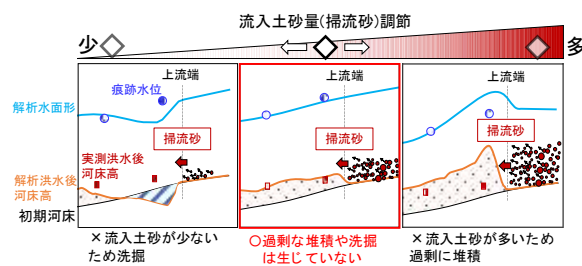


図-8 掃流砂の流入土砂量ハイドログラフの推定

洪水後の細粒土砂の土砂の堆積を再現することに重点を置き、浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフとその検討条件を決め、これらを図-9(a)と表-2に示す。

各検討ケースの各時間帯の流入浮遊砂量 $C_k Q(t)$ は、まず、式(1)で洪水流量ハイドログラフ全体の平均浮遊砂濃度 C_k を算定した。そして、算定した C_k を基に、流量が高い時間帯は、浮遊砂濃度も高く、流量が低い時間帯の浮遊砂濃度は低くなるとし、各時間帯の流量 $Q(t)$ に応じて流入浮遊砂濃度を増減させることで設定した。

$$C_k = f_k \frac{V_{su}}{\int_0^T Q(t) dt} \quad (1)$$

ここで、 C_k ：浮遊砂濃度、 f_k ：粒径割合、 V_{su} ：総流入浮遊砂量、 $Q(t)$ ：時刻 t の流量、 T ：洪水継続時間である。総流入浮遊砂量 V_{su} は、まず、本川と御勅使川から流入させた掃流砂と浮遊砂の土砂量の合計値が、図-2に示す実測の総堆積土砂量(220万 m^3)と同程度となるよう120万 m^3 とし、その後、解析と実測の堆積土砂量の差に応じて、その過不足分だけ浮遊砂の流入土砂量を増減させることで与えた。浮遊砂の流入土砂の粒度分布は、実測洪水後の粒度分布に基づき、ケースAからケースCの3通りの分布形を設定した(図-10(a))。これにより図-9(a)に示す浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフを作成した。

また、御勅使川の浮遊砂の粒度分布は、掃流砂と同様に釜無川の実測洪水後を参考に図-10(b)のように設定した。御勅使川の浮遊砂の流入土砂量については、洪水流量ハイドログラフ全体の平均浮遊砂濃度 C_k が、ケース1の釜無川の C_k と同程度になるとし、浮遊砂の総流入土砂量を21万 m^3 とした。各時間帯の流入浮遊砂量は、釜無川と同様に C_k を各時間帯の流量に応じて調節し、図-9(b)の浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフを与えた。なお、そ

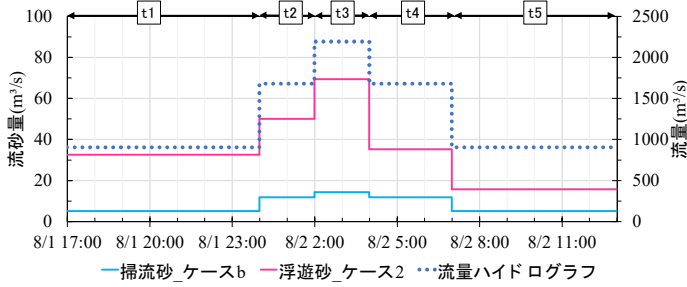
表-1 掃流砂の検討条件

	掃流砂の流入土砂量(本川)	掃流砂の流入土砂量(御勅使川)	粒度分布(掃流砂)
ケースa	27万m ³	平衡流砂量	図-10(a)の掃流砂の粒度分布を与えた
ケースb	55万m ³		
ケースc	82万m ³		
ケースm-a	ケースb(55万m ³)	14万m ³	図-10(b)の掃流砂の粒度分布を与えた
ケースm-b		27万m ³	
ケースm-c		40万m ³	

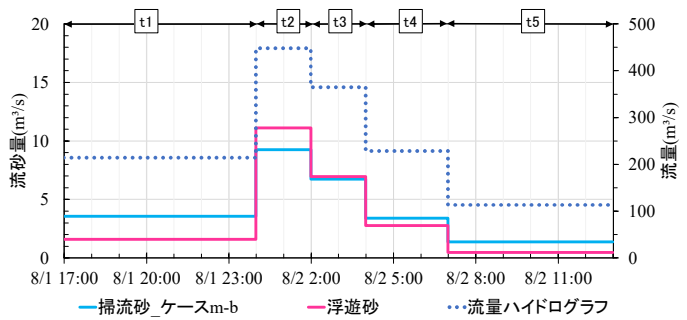
表-2 浮遊砂の検討条件

ここで、括弧内の値は本川と御勅使川から流入させた掃流砂量と浮遊砂量の合計値を示す。

	本川浮遊砂(総流入土砂量)	粒度分布(浮遊砂)
ケース1-A	120万m ³ (220万m ³)	A
ケース1-B	120万m ³ (220万m ³)	B
ケース1-C	120万m ³ (220万m ³)	C
ケース2-B	240万m ³ (340万m ³)	B
ケース2-C	240万m ³ (340万m ³)	C



(a) 釜無川



(b) 御勅使川

図-9 流入土砂量ハイドログラフ

他の支川からの流入土砂は、平衡流砂量を与えた。

(4) 解析条件

大量の土砂流入を伴う土砂移動現象は、複雑であり、大局を捉えるため、洪水流・河床変動解析には準定常一次元解析法を用いる。洪水流は、式(2)、式(3)に示す流れの連続式と運動方程式を用い、河床変動は、式(4)で計算され、浮遊砂の輸送は、式(6)で計算した。掃流砂 q_{bk} は芦田・道上の式⁴⁾、浮遊砂の浮上量は、板倉・岸の式⁵⁾で算定した。河岸侵食により供給される土砂は、図-3の河岸侵食量を各地点の河岸と高水敷の侵食が、洪水が川幅いっぱいで行われる8/1 23時~8/2 6時の時間帯に発生するとし、河岸侵食量を河道に供給される流砂量 q_{ber} として与え河床変動解析を行った。

$$\frac{\partial Bh}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

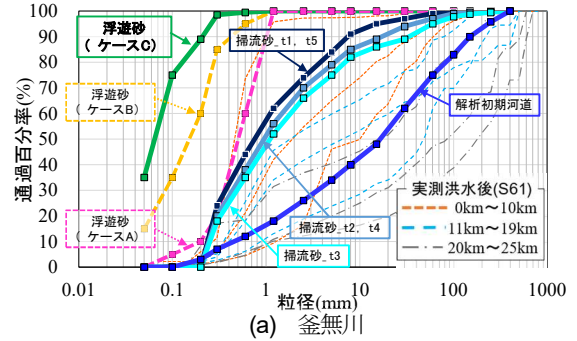
$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho R}, \quad \tau_0 = \frac{\rho g n^2}{R^{1/3}} U^2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{-1}{1-\lambda} \frac{1}{B} \sum_k \left\{ \frac{\partial B q_{bk2}}{\partial x} + B (q_{suk} - C_{bk} w_{gk}) \right\} \quad (4)$$

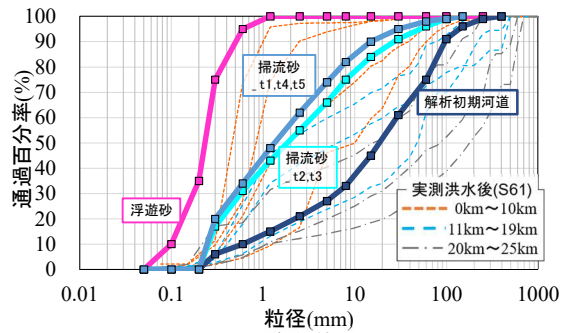
$$q_{bk2} = q_{bk} + q_{ber} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial C_k Q}{\partial x} = q_{suk} - C_{bk} w_{gk} \quad (6)$$

ここで、 z_b : 河床高、 h : 水深、 Q : 流量、 λ : 空隙率



(a) 釜無川



(b) 御勅使川

図-10 流入土砂量ハイドログラフの粒度分布

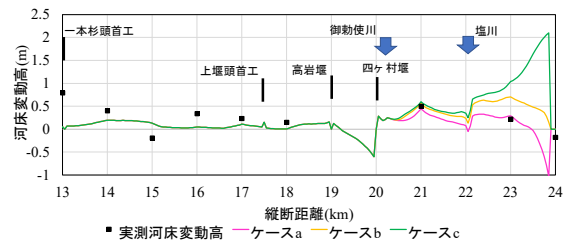


図-11 掃流砂の異なる流入土砂量ハイドログラフの検討で得られた河床変動高の縦断分布の比較

(=0.4), q_{bk} : 粒径 k の材料の単位幅掃流砂量, q_{suk} : 粒径 k の材料の河床からの単位面積当たりの浮上量, q_{ber} : 河岸侵食により生じた流砂量, C_k : 水深平均浮遊砂濃度, g : 重力加速度である。 w_{gk} は沈降速度を示し、Rubeyの式を用いた。 C_{bk} は浮遊砂の底面濃度を示し、鉛直濃度分布にRouse分布を仮定した。各粒径の限界掃流力は、岩垣の式⁶⁾と修正Egiazaroff式⁴⁾で評価した。流砂量算定に用いる無次元掃流力は、24kmから13kmの急勾配区間では全せん断力を、13mから下流では、河床波の存在を考慮するために有効掃流力を用いた。

解析初期河床の粒度分布は、実測洪水後の粒度分布を参考に図-10で与えた。

3. 解析結果

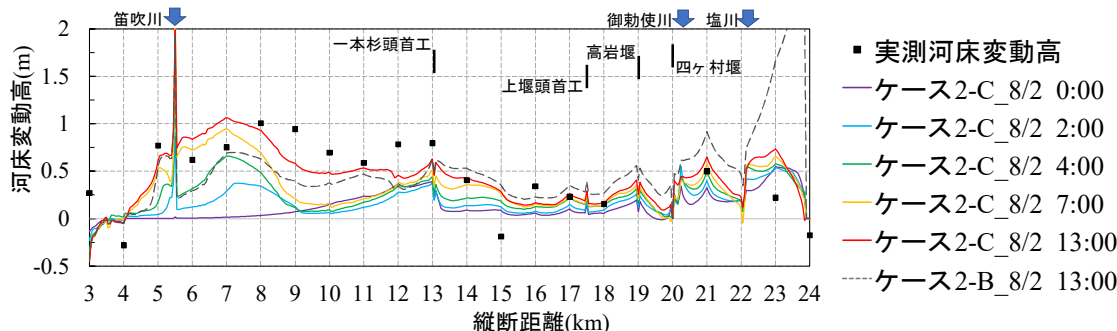


図-12 河床変動の縦断分布の時間変化(ケース2-C)

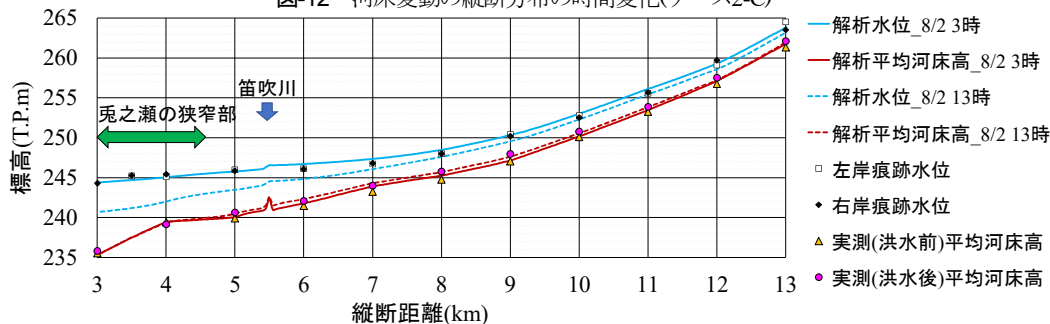


図-13 流量ピーク時の解析水面形(ケース2-C)

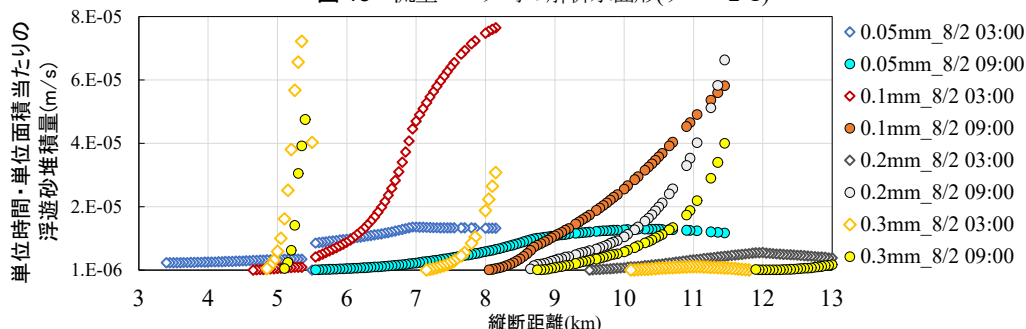


図-14 各時間での浮遊砂の河床への堆積量の縦断分布

(1) 流入土砂量ハイドログラフの推定結果

前章で示した検討条件のもと、各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフの推定結果を示す。本川の流入掃流土砂量は、表-1に示すケースを検討し、図-11に、流入掃流砂の検討で得られた各ケースの河床変動高の縦断分布の比較を示している。各ケースの解析結果は、24km～22kmで大きく異なっており、ケースaは上流端付近で大量の土砂堆積が生じ、ケースcは大きな洗掘が生じた。以上より、本研究では、第一近似としてケースb(総流入土砂量55万m³)の流入土砂量ハイドログラフを採用した。御勅使川からの掃流土砂量は、ケースm-b(総流入土砂量27万m³)を採用した。求めた流入掃流土砂量ハイドログラフを図-9に示す。ただし、御勅使川を含む、支川群からの掃流砂・浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフに関しては、今後さらに検討する必要がある。これらの流入掃流土砂量ハイドログラフを既知量として、次に、浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフの検討を行った。

浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフについて、流入浮遊砂量は、実測の総堆積土砂量を参考に設定し、流入浮遊砂の粒度分布はケース1-Aからケース1-Cの3ケースを計算した(表-2)。ケース1-Aは、上流端付近に実測と大き

く異なる土砂堆積が生じた。一方、ケース1-Bやケース1-Cは、13km-6km区間の土砂堆積高が実測よりやや小さく、実測と比べ60万~90万m³程度少なく計算されたものの、他の区間は比較的実測に近い解析結果を示した。

これを踏まえ、ケース2では、流入土砂の粒度分布はそれぞれケース1-Bとケース1-Cの条件のまま、浮遊砂量を120万m³増加させ240万m³とした解析を行った。

ケース2-Bとケース2-Cの洪水後河床変動高の縦断分布を図-12に示す。ケース2-Bは、上流区間に堆積が生じており、13km-6km区間の土砂堆積も実測と比べ小さい。一方ケース2-Cは、実測の堆積傾向を比較的良好に説明している。以上より、ケース2-Cの各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフが最も実測洪水後の土砂堆積縦断分布を説明した。

(2) 解析結果の考察

図-13はケース2-Cの流量ピーク時の解析水面形と痕跡水位の縦断分布の比較を示すが、両者はよく対応している。次に、著しい土砂堆積の生じた13km-6kmの河床変動について考察する。図-12は、ケース2-Cの河床変動高の時間変化を示し、図-14は、8/2 3:00(流量ピーク)と8/2

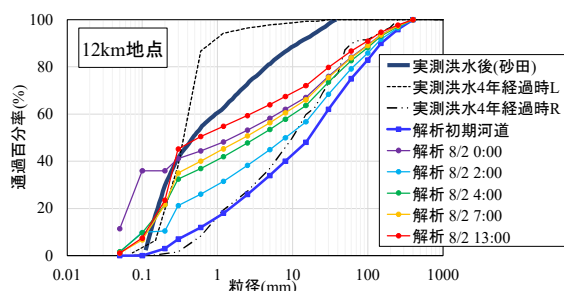


図-15 12km地点における実測と解析の洪水後粒度分布の比較(ケース2-C)

9:00(洪水減水時)における単位時間・単位面積当たり河床へ堆積する浮遊砂量(沈降量-浮上量)の縦断分布を示す。図-13に示すように、8/2 3:00時点(流量ピーク)では、8kmから下流区間は、河床勾配の変化と笛吹川の合流、兎之瀬の狭窄部による背水の影響を受け、水面勾配が緩くなる。このため、図-14に示すように、8kmから6kmに0.1mmの浮遊砂が大きく堆積し、8/2 2:00から8/2 7:00の土砂堆積量が多くなっている(図-12)。また、8/2 9:00には、流量が減少し掃流力が低下するため、図-14に示すように、12kmから8km区間に0.1mm~0.3mmの浮遊砂が多く堆積している。そのため、図-12に示すように、8/2 7:00から8/2 13:00にかけて、12kmから8kmの土砂堆積が生じた。

図-15は、与えた上流端境界条件に対する12km地点における解析(ケース2-C)で得られた各時間の粒度分布と、砂田⁷⁾によって測られた洪水後(S58)の観測値を示す。まず、洪水後の観測結果と解析結果を比較すると、解析結果の方が、粗い粒径の割合が大きいものの、実測に見られた河床材料の細粒化が計算された。また、粒度分布の時間変化については、8/2 0:00には、0.05mm~0.1mmの粒径割合が増加し、粒度分布は一時的に細粒化するものの、これらの粒径割合は、流量の増加に伴い減少している。その後、流量ピーク付近になると、図-14に示すように、12km付近に0.2mmの浮遊砂が堆積し、その粒径割合が増加した。洪水減水期には、0.3mmの浮遊砂が徐々に堆積することで、粒度分布の細粒化が起きている。

4. 結論

本検討では、昭和57年8月大洪水で大量の土砂流入があった釜無川を対象に、準定常一次元洪水流・河床変動解析を用いて、洪水後の河床形状を再現するように各粒径集団の流入土砂量ハイドログラフを推算し、これを用いて洪水中に起こった土砂堆積の機構を推定した。以下に得られた結果と課題を示す。

掃流砂の流入土砂量ハイドログラフは、大きな粒径の土砂は、検討区間より上流で堆積しやすいことを考慮し、検討区間に流入する土砂は、比較的小さい粒径集団を与えた。浮遊砂の流入土砂量ハイドログラフは、下流河道

の土砂堆積状況を説明するように、粒度分布と土砂量を複数ケース検討し求めた。

解析の結果、上流山地から流入した大量の細粒土砂は、支川合流や狭窄部、勾配変化による背水の影響を受ける8kmから6km区間に堆積し、洪水減水期に、掃流力の低下により、12kmから8km区間に堆積したことが明らかとなった。また12km地点の粒度分布は、洪水初期に一度細粒化するが、流量の上昇とともに細粒土砂の割合は減少した。その後、再び細粒土砂が堆積することで、洪水後の観測値に見られた粒度分布の細粒化が計算された。

本研究で与えた昭和57年8月洪水の上流端での土砂の解析条件は、洪水や土砂のデータが十分観測されていないために、図-7に示した実測データとの比較や解析結果の分析だけでは、その妥当性を検討できたかどうか確かではない。適切な流入土砂量ハイドログラフを決定するためには、洪水流量ハイドログラフと粒径集団毎の流入土砂量ハイドログラフの関係、本・支川の土砂流入のタイミングが異なるケース等について検討することが必要である。今後は、このような検討を行い、上流端境界条件で与えた土砂がどのように下流に伝播し河床を形成していくかを明確にするとともに、解析法の信頼性を高める必要がある。

大量の土砂流入がある河川の河床変動解析において、土砂の上流端境界条件を決める方法の確立は、容易ではないが、本研究は、解決法の一つの道筋を示すものであると考えている。今後、大量の土砂流入のある河川の洪水後の現地データの取得と解析法の精度向上の両面から検討が必要である。

参考文献

- 1) 山野井一輝, 藤田正治: 豪雨時の水・土砂災害に関わるハザード群の発生リスク評価, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I_1291-I_1296, 2016.
- 2) 藤田正治: 山地域の土砂動態研究, 今後への期待, 砂防学会誌, Vol.70, No.6, pp.1-2, 2018.
- 3) 岡安光太郎, 池田博明, 福岡捷二, 後藤岳久: 大量の土砂が流入する河川の境界条件である土砂量ハイドログラフの実用的推定法の研究-平成7年7月姫川大洪水を例にして-, 河川技術論文集, 第24巻, pp.167-172, 2018.
- 4) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 5) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, J. of Hydraulics Div. Proc. ASCE, Vol.106, HY.8, pp.1325-1343, 1980.
- 6) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21, 1956.
- 7) 砂田憲吾: 釜無川(富士川)における一洪水による河床変動, 土木学会論文集, 第363号, II-4, pp.235-243, 1985.

(2021. 4. 2受付)