

土砂・洪水氾濫メカニズムを踏まえた 数値解析モデル構築における一考察

DEVELOPMENT OF A NUMERICAL ANALYSIS MODEL CONSIDERING SEDIMENT AND FLOOD INUNDATION MECHANISMS

和田 浩幸¹・原田 紹臣²・黒澤 祥一³・河野 文俊⁴・里深 好文⁵

Hiroyuki WADA, Norio HARADA, Shoichi KUROSAWA, Ayatoshi KAWANO and Yoshifumi SATOFUKA

¹三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒552-0007 大阪市港区弁天 1-2-1-900)

E-mail: wada-hiroyuki@mccnet.co.jp

²三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒552-0007 大阪市港区弁天 1-2-1-900)

E-mail: harada@mccnet.co.jp

³三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒141-0032 東京都品川区大崎 1-11-1)

E-mail: kurosawa@mccnet.co.jp

⁴三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒552-0007 大阪市港区弁天 1-2-1-900)

E-mail: kawano-ayatoshi@mccnet.co.jp

⁵立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: satofuka@se.ritsumei.ac.jp

Key Words: Sabo dam, sediment and flooding damage, sediment runoff, simulation

1. はじめに

近年, 気候変動等の影響を受けた土砂と洪水が相まって氾濫する土砂・洪水氾濫の被害が全国的に顕在化しており, これらの対策に際して, 予測精度の高い数値解析による検討が求められている^{1),2),3)}.

この様な中, 2022年台風15号の影響を受けて, 一級河川大井川の支流域において, 顕著な河床上昇に伴う土砂・洪水氾濫が発生した(図-1). ここで, この被災要因の一つとして, 災害後の現地状況⁴⁾等より, 集中豪雨に伴う多量の土砂生産と, 本川大井川の水位上昇に伴う上流支川への背水による影響(河床上昇)であったと推測される(図-2). なお, この河川合流部は, 洪水時において土砂の堆積等に伴って水位が上昇するため, 古くから氾濫の危険性が高いこと^{5),6)}が知られており, 土砂・洪水氾濫対策において, これらの背水による影響の予測は重要であると考えられる. また, 豪雨時の山腹崩壊では広

範な粒径範囲の土砂が生産され, 土石流となって流下してくる. このような土石流においては, 細粒成分の土砂が浮遊して水と一体となり高密度流体を形成し, 粗粒土砂を下流まで運搬することが一般的に知られている. そのため, 流砂中の粒度分布を考慮した影響(例えば, 液体相の間隙流体密度の変化)



図-1 土砂・洪水氾濫の被災状況 (R4 台風15号, 大井川支流)

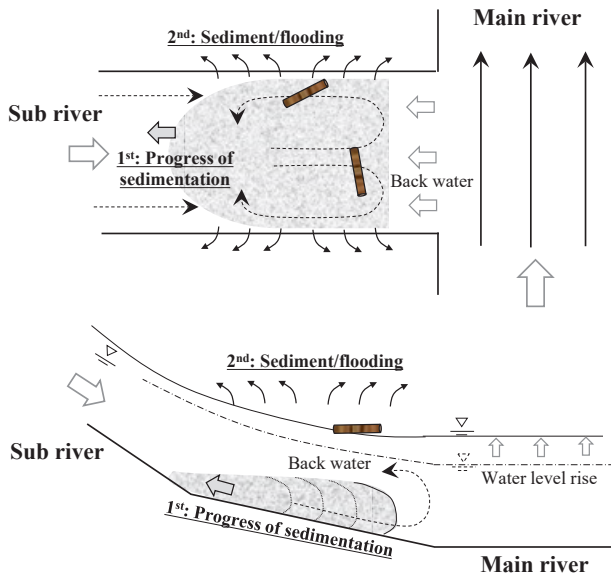


図-2 現地状況より推測した土砂・洪水氾濫メカニズムの概要
(上:平面図, 下:縦断面図)

の予測について配慮することが指摘されている³⁾。

本稿では、土砂・洪水氾濫メカニズム(例えば、図-2)を考慮した予測精度の高い数値解析による土砂・洪水氾濫対策の検討に向けて、これまで筆者らが提案してきた次元河床変動解析モデル⁷⁾を基本に、本川からの背水による影響を受けた支川における河床変動を再現した実験結果を用いて検証する。さらに、この解析モデルを用いて、実際の山地河川を対象にモデル化して試行的に検討し、適用性や今後の課題について考察する。

2. 土砂・洪水氾濫対策に向けた解析モデル開発

本研究で基本とする土砂流出予測モデル^{7,8)}は、流域を複数の斜面群と一組の河道網とによって表現した次元河床変動解析を目的としている。なお、前述に示すとおり、現在、土砂・洪水氾濫対策の計画において数値解析による検討^{1),3)}が求められているため、本研究では、想定される対策工(砂防堰堤等^{1),9)}の施設効果に対する評価機能を拡張して改良する。以降にモデルの概要について示す。

(1) 河道部における流砂に関する基礎式

水と土砂を対象にした全容積の連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial qB}{\partial x} = i_{sb} K_1 + \frac{q_m}{B} \quad (1)$$

と表される。ここに、 h :水深、 q :単位幅流量、 B :水みち幅、 q_m :側方からの単位長さあたりにおける水と土砂の流入量、 i_{sb} :水みち底面の侵食($i_{sb} > 0$)

または堆積($i_{sb} < 0$)速度である。なお、本解析は、基本的に幅広い混合砂礫を対象としており、粒度の分布範囲を k_e 個の粒径階に分割し、 k 番目における粒径階の粒径を d_k で表している($d_1 < d_k < d_{k_e}$)。なお、特定の粒径 k_1 より小さい粒子は水と一体となって流体相を形成すると仮定し、細粒子(粒径成分 $k:1 \sim k_1$)として取り扱う。また、固体相として挙動する粒径を粗粒子(粒径成分 $k:k_1+1 \sim k_e$)として取り扱う。

ここで、粗粒子の容積濃度 C_L ならびに細粒子が間隙水中に占めている容積濃度 C_F は、それぞれ、

$$C_L = \sum_{k=k_1+1}^{k_e} C_k \quad (2)$$

$$C_F = (\sum_{k=1}^{k_1} C_k) / (1 - C_L) \quad (3)$$

$$\rho_m = \rho + \frac{\sigma - \rho}{1 - C_L} \sum_{k=1}^{k_1} C_k = \rho + (\sigma - \rho) C_F \quad (4)$$

$$d_{mL} = (\sum_{k=k_1+1}^{k_e} d_k C_k) / C_L \quad (5)$$

と表される。ここに、 C_k : k 番目の粒径階が全容積中で占める割合および ρ :水の単位体積質量である。なお、 $i_{sb} > 0$ (侵食)の場合における k_1 は、

$$K_1 = C_L + (1 - C_L) \{ C_F + (1 - C_F) s_b \} \quad (6)$$

と表される。ここに、 s_b :水みち底面から侵食される堆積物の飽和度である。なお、 $i_{sb} < 0$ (堆積)の場合は、 $K_1 = 1$ とする。

各粒径階の砂粒における連続式は、

$$\frac{\partial(C_k h)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial(q C_k B)}{\partial x} = i_{sbk} \quad (7)$$

と表される。ここに、 i_{sbk} :粒径階 k における粒子の侵食または堆積速度である。ここで、本解析モデルの予測精度に関して、筆者らは現地の観測結果との比較により検証している。なお、その他の詳細については先行研究⁷⁾を参照されたい。

(2) 対策工の施設効果に対する評価モデル

細粒成分を含んだ土砂調節に関して、一般的に想定される不透過型砂防堰堤や遊砂地等の対策工¹⁾における調節効果を評価するために、一部改良を加えて取り込んだ既往解析モデル⁹⁾の概要について示す。本解析モデルはスタガード・スキームを用いて計算しており、流速計算地点(u_i :図-3)における水深については、風上側(h_i)を用いて計算する。堰堤地点の水深計算に関して、直上流の河床位が堰堤天端高を超えている場合はその水深を堰堤地点の水深とし、堰堤直上流の河床位が堰堤天端高を超えない場合は堰堤直上流の水位と堰堤天端高との差を堰堤地点の水深としている。また、堰堤直上流の水位が堰

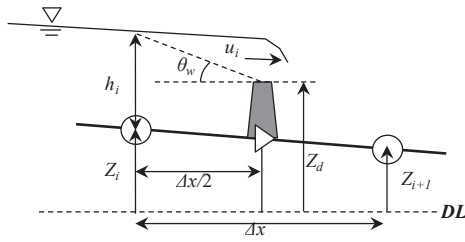


図-3 砂防ダム地点における変数の配置と水面勾配の設定

堤天端高を超えない場合は堰堤地点の水深を最小水深に等しいとし、流速を0と仮定している。その他については既往文献⁹⁾を参考されたい。

3. 実験結果の再現による解析モデルの検証

近年に発生した土砂・洪水氾濫(図-1)を対象に、環境条件や現地調査結果⁴⁾より推測した下流本川水位上昇に伴う上流支川への背水による影響(図-2)を考慮するため、実施した基礎的な実験結果を用いてモデルの適用性について検証する。以降に、実施した実験の概要について示す。

実験に使用した合流部(本川、支川)を有した水路(固定床;河床に砂礫を固着)を図-4に示す。図-4に示すとおり、実規模に対して、1/30程度の縮尺を想定し、幅 $w_1 = 70\text{ cm}$ 、長さ $L_1 = 1500\text{ cm}$ 、高さ $h_1 = 25\text{ cm}$ 、本川河道勾配 $\theta_1 = 1/100$ の直線水路に対して、本川下流端から上流 $L_3 = 500\text{ cm}$ の位置に右岸側から平面流入角 $\phi_1 = 45$ 度(図-5)で流入させた支川(幅 $w_2 = 40\text{ cm}$ 、長さ $L_2 = 500\text{ cm}$ 、なお、高さ $h_2 = 25\text{ cm}$ 、支川河道勾配 $\theta_2 = 1/25$)を有した構造としている。本川上流端から水($q_1 = 11\text{ L/s}$ 、上流端平均水深 $h_{w1} = 2\text{ cm}$ 、 $Fr = 1.6$)、支川上流端から水($q_2 = 6\text{ L/s}$ 、平均水深 $h_{w1} = 1.5\text{ cm}$ 、 $Fr = 2.9$)及び河道に堆積させた土砂($W_{sin} = 10\text{ kg}$ 、硅砂3号¹⁰⁾)を侵食により上流から供給し、合流部付近における流砂状況について観察する。その際、本川水位の変化に伴う背水による支川への影響を把握するため、本川下流端に可動式の越流堰($h_1 = 10\text{ cm}$)を設けている(図-4)。

本川下流端に堰を設置した場合(本川からの背水影響有り)における支川の流砂状況を図-5に示す。図-5に示すとおり、支川から供給された土砂は、水位が上昇した本川からの背水による影響を受けて、合流部からの距離 $L_4 = 60\text{ cm}$ ($L_4' = 110\text{ cm}$)付近の上流支川において、一般的に貯水池上流において見られる顕著な堆砂デルタ¹¹⁾に伴う顕著な河床上昇が確認された。また、支川における堆砂デルタの詳細

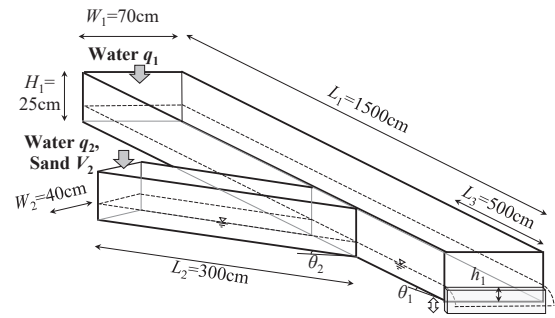


図-4 水路実験の概要(合流部を有する実験水路)

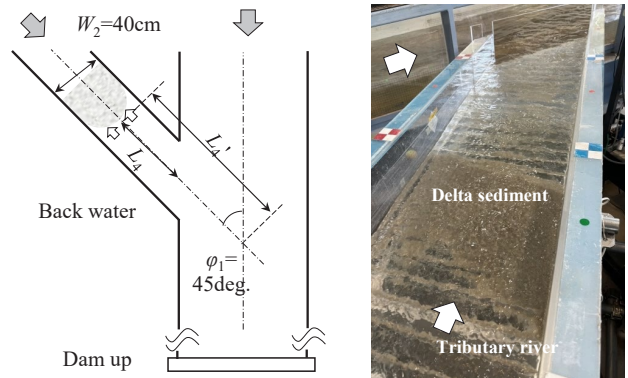


図-5 実験結果(本川水位: 高, 左: 平面図, 右: 鳥瞰写真)

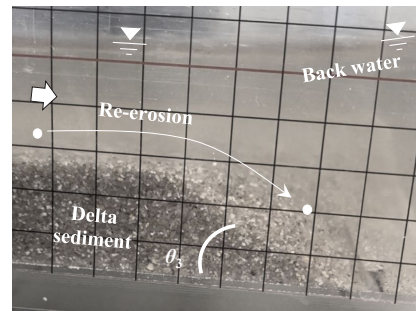


図-6 本川水位上昇に伴う背水による堆砂デルタ移動状況

な状況を図-6に示す。図-6に示すとおり、堆砂デルタの堆砂縦断勾配 $\theta_3 = 35$ 度程度の形状を保ちながら、堆積した堆砂デルタが後続流からの再侵食により、下流へゆっくりと再移動する様子が確認された。これらに示されるとおり、今回発生した土砂・洪水氾濫(図-1)の要因の一つとして、下流本川における水位上昇に伴う背水による影響(図-2)が検証された。なお、この背水に伴った支川の河床上昇(堆砂デルタの形成)に影響を受けた縦断位置の予測が重要であると考えられる。

ここで、前述までに提案する解析モデルにおける下流合流部からの背水による影響(堆砂デルタの形成とその位置)の予測精度について、実験結果と解析結果(合流部からの堆砂デルタ位置までの距離 L_4)とを対比させた結果を図-7に示す。その際、解析条

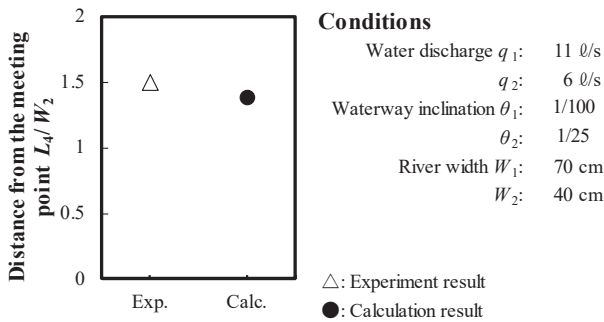


図-7 堆砂デルタ位置予測に関する実験と解析結果の比較

件として、既往研究^{7),8)}等を参考に、初期河床厚を 0 cm, $\sigma=2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, 粒径 $\phi=1 \text{ mm}$, 河床の容積濃度 0.65, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, 堆積速度係数を 0.0002, マニングの粗度係数を $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$, 解析時間 300 秒, 流入量(本川 $q_1=11 \text{ L/s}$, 支川 $q_2=6 \text{ L/s}$)とする。また、それぞれの結果において、合流部からの堆砂デルタ位置までの距離 L_4 を支川河道幅 w_2 で除して無次元化した値で評価している。図-7 に示すとおり、概ね、堆砂デルタ位置が再現されていることが確認された。また、定性的ではあるが、時間的な変化(例えば、堆砂デルタの再移動)についても確認している。なお、その他の実験結果等については、紙面の関係より、別途、報告する予定である。ここで、今回実施した実験は限られた条件における実験による検証であるため、今後、更なる検証が望まれる。

4. 試行的検討によるモデル適用性に関する考察

前述までに提案する解析モデルを用いて、実際の山地河川(図-8: 平面位置図, 図-9: 縦断面図)を対象に、対策工(不透過型堰堤形式の遊砂地: Sabo dam, 高さ: 8 m, 位置: No. 80)の設置有無等の違いについて試行的に検討し、それらの適用性について考察する。ここで、前述に示す式(4)では、流体相の間隙流体密度 ρ_m に対して影響を与える細粒土砂(細粒子)の粒径範囲を経験的に一定⁸⁾で固定させている。しかしながら、近年、土砂・洪水氾濫の数値解析における新たなモデル(摩擦速度と浮遊砂の沈降速度から細粒土砂の粒径限界を逐次に変化させたモデル¹²⁾)が提案されている。このモデルでは、粗面を有する河床付近における鉛直方向の乱れ強度が摩擦速度にほぼ等しくなる関係性を参考に、沈降速度に対する摩擦速度が大きくなるに伴って細粒土砂の限界粒径も大きくなると仮定した考え方に基づいて

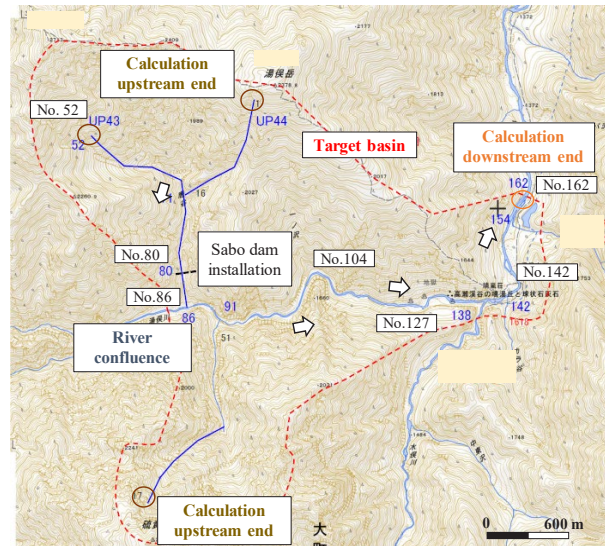


図-8 試行計算で対象とする流域の平面位置図

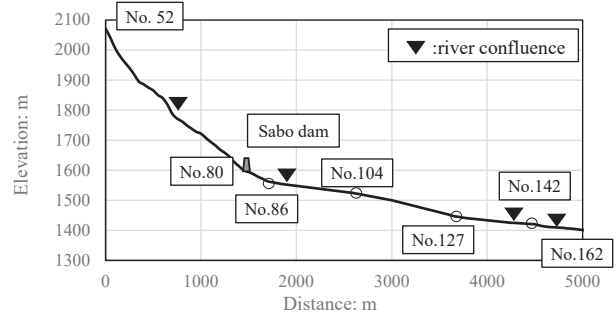


図-9 解析対象流域の縦断面図(一例)

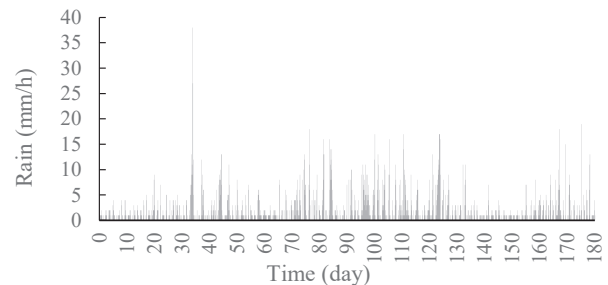


図-10 解析期間における降雨条件

設定している。さらに、細粒土砂の限界条件も浮遊限界と同様に記述できるものとし、次の関係式を満たす粒径を限界の粒径としている。

$$u^* = a_c \cdot w_s \quad (8)$$

ここで、 u^* は摩擦速度、 w_s は土粒子の沈降速度、 a_c は係数である¹³⁾。

そこで、前述までに示した解析モデルを拡張させて、この新たな浮遊砂の沈降速度から流体相の間隙流体密度 ρ_m を逐次更新し、併せて試行的に検討する。ここで、解析条件として、現地条件や既往研究⁷⁾を参考に、初期河床厚を 0~200 cm, $\sigma=2650 \text{ kg/m}^3$,

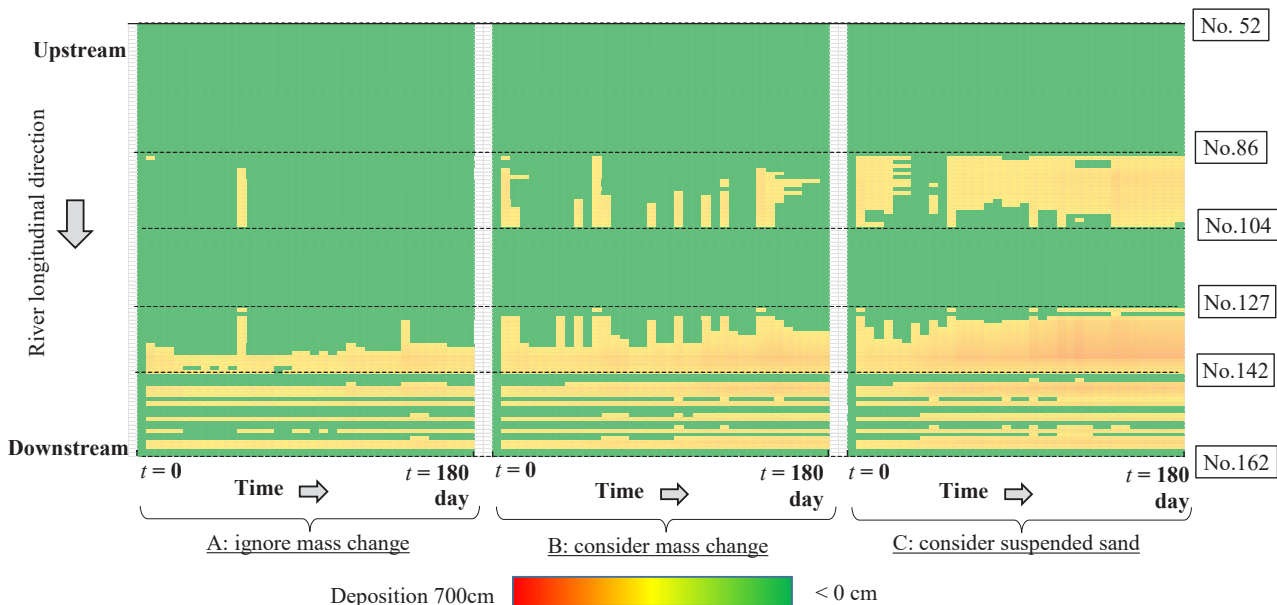


図-11 解析結果(対策工無, A: 流体相の密度固定, B: 土砂濃度変化を考慮, C: 土砂濃度変化及び沈降速度を考慮)

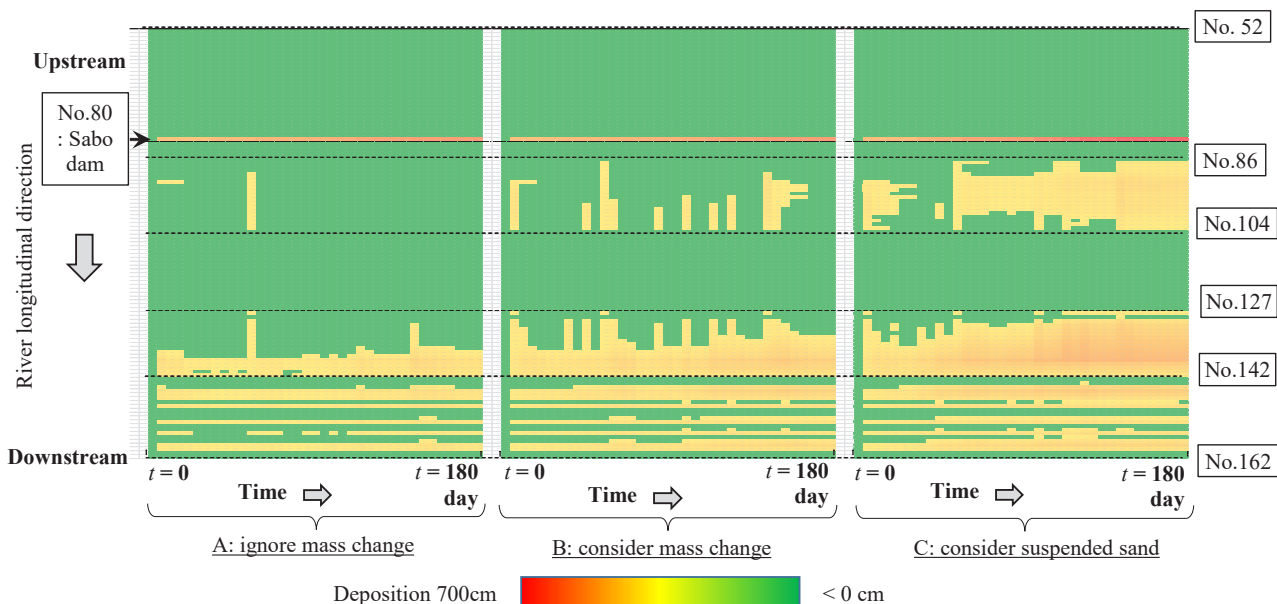


図-12 解析結果(対策工有, A: 流体相の密度固定, B: 土砂濃度変化を考慮, C: 土砂濃度変化及び沈降速度を考慮)

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 粒径 $\phi = 0.0479 \sim 490 \text{ mm}$, 河床の容積濃度 0.65 , $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 堆積速度係数を 0.0002 , マニングの粗度係数を $0.03 \sim 0.05 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, 降雨量(実降雨: 図-10, 最大降雨強度: 38 mm/h), 解析時間 180 日とする. なお, この間には, 顕著な土砂生産が見られなかったため, 洪水のみを供給している. 以降に, 得られた解析結果について示す.

対策工無における河床変動(初期河床からの変動量)の時間的変化を図-11に, 対策工有の結果を図-12にそれぞれ示す. なお, 各図の左から流体相の間隙流体密度を一定 (Type A, $\rho_m' = 1400 \text{ kg/m}^3$), 流砂量の変化を考慮した流体相の間隙流体密度 (Type B,

細粒土砂の限界粒径を一定, 細粒子の流体限界粒径 6.372 mm : 試算より設定), 更に浮遊砂の沈降速度により推定される細粒土砂の限界粒径を逐次に変化させた流体相の間隙流体密度 (Type C, $\alpha_c = 1$)¹⁴⁾とし, それぞれ, 縦軸(縦断位置, 上: 上流)と横軸(解析時間)における河床変化(朱: 堆積, 緑: 侵食)の傾向について, それぞれ計算手法毎に示している. ここで, 設定した移動床(厚さ)については, 現地における一定間隔(100m 程度)毎に計測された平均値を採用しており, 実河道における最深部等の詳細については不明瞭であるため, 本検討では堆積(朱)について着眼している. 実河道における図-11に示

すとおりに、緩勾配区間（No.86～104, No.127～142, 最下流付近）で堆積傾向が見られている。その際、Type A においては堆積（特に、No.86～104）が小さい結果であった。一方、浮遊砂の沈降速度を考慮した Type C においては、再侵食が生じず、顕著な堆積傾向を示す結果であった。この要因の一つとして、浮遊砂の沈降速度を考慮（Type C）した場合、一度、堆積して形成された緩勾配地形に応じた摩擦速度の低下に伴って、細粒土砂の限界粒径が更に小さくなるため、結果的に、再侵食の現象が再現できなかったものと考えられる。なお、Type C の解析結果における ρ_m ' は 1000～1697 kg/m³ の範囲であった。今後、更なる検証が求められる。

次に、対策工有の場合、図-12 に示すとおりに、図-11（対策工無）と比較して、下流域における対策効果（堆砂が減少している傾向）が確認された。しかしながら、これらの対策効果については、対策工直下付近でしか見られない傾向であり、今後、施設配置において留意が必要である。ここで、浮遊砂の沈降速度を考慮した場合による影響は、図-11 と同じく、Type B と Type C とで顕著に堆積傾向が異なる傾向であることが分かった。これらの結果より、沈降速度の評価は重要であると考えられ、今後、流体相における間隙流体密度の変化やその影響などに関する更なる議論の重要性が示唆された。なお、本検討事例は、今後の解析モデルの高度化に向けて、今後の方向性や課題について議論していくために検討したものであり、更なる検証が望まれる。

5. おわりに

本稿では、数値解析に基づいた土砂・洪水氾濫対策に向けて構築した解析モデルを対象に、実験結果との比較により、その妥当性について検証した。さらに、実際の山地河川を対象に施設効果について試行的に検討し、解析モデルの適用性や今後の課題について考察した。本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 提案する解析モデルの妥当性に関して、実験結果から得られた合流部からの背水に伴う堆砂デルタ位置の予測に対する再現性が示唆された。
- 2) 解析モデルを用いた試行的な検討の結果、流体相の間隙密度の評価方法を変えたことによる流砂量の変化について更なる議論が重要であることが示唆された。今後、更なる検証が望まれる。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準，2021
- 2) 原田紹臣，藤本将光，小杉賢一朗，里深好文，水山高久：土砂・洪水氾濫対策の施設規模における計画規模の設定方法に関する考察，河川技術論文集，Vol. 28，pp. 355-360，2022.
- 3) 内田太郎，小松美緒，坂井佑介：河床変動計算を用いた土砂・洪水氾濫対策に関する砂防施設配置検討の手引き（案），国土技術政策総合研究所資料，Vol. 1048，2018.
- 4) 国土交通省：TEC-FORCE 川根本町における被災状況調査報告書，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>，2021.
- 5) Weerakoon, S. B., Tamai, N. and Kwahara, Y.: Bed topography, bed shear stress distribution and velocity field in a confluence, *Proceedings of hydraulic engineering, JSCE*, No.34, pp.307-312, 1990.
- 6) Weber, J. L., Schumate, E. and Mawer, N.: Experiments of flow at a 90°open-channel junction, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.127, No.5, pp.340-350, 2001.
- 7) 原田紹臣，里深好文：活発な土砂生産・土砂流出を考慮した洪水予測技術に関する研究，河川技術論文集，Vol. 19，pp. 217-222，2013.
- 8) Takahashi, T.: Debris flow, mechanics, prediction and countermeasures, 2nd edition, *CRC press*, 2019.
- 9) 里深好文，水山高久：砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算，砂防学会誌，Vol.58，No.1，pp.14-19，2005.
- 10) 三河珪石株式会社：珪砂，<http://www.mikawakeiseki.co.jp/silica.html>，2022
- 11) 茶石貴夫，前田修一：貯水池内の堆砂の堆積とその対策，応用地質，Vol. 43，No. 5，pp. 316-319，2002.
- 12) 西口幸希，内田太郎，石塚忠範，里深好文，中谷加奈：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーションー深層崩壊に起因する土石流への適用ー，砂防学会誌，Vol. 64，No. 3，pp. 11-20，2011.
- 13) 日名純也，内田太郎，松本直樹，桜井 亘，西口幸希，村上正人：細粒土砂の挙動に着目した土石流の数値計算手法に関する一考察，第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集，Vol. 9，pp. 207-212，2018.
- 14) 内田太郎，中村直登，西口幸希，日名純也，村上正人，松本直樹，泉山寛明，桜井 亘，里深好文：豪雨時の山地中小河川の土砂動態計算：平成 29 年九州北部豪雨時の土砂動態再現計算，第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集，Vol. 9，pp. 91-96，2018.

(2024. 5. 31 受付)