

# 常願寺川における河床・流路変動特性の検討

山本 悠賀・久加 朋子†

(工学部 環境・社会基盤工学科)

要約：本研究では、常願寺川を対象とし、河川区間における近年の経年的な河道内物理環境の変化と、河床・流路変動特性の把握を目的とした。現地データの整理からは、砂利採取量の増減が河床材料に大きな影響を与えることが確認でき、採取量の減った近年では、河口から 6.0k 区間で細粒化、6.0k 以降では粗粒化傾向が見られた。数値解析では、既往 6 位の 700m<sup>3</sup>/s 規模出水の場合、8.0k を境界にして上流域では河床変動が明瞭な反面、下流域では河床変動がほぼ生じない結果となった。これは、上流域では、ピーク流量時から減水期にかけて土砂が急激に停止することで大きく河床変動する一方で、下流域では掃流砂量が小さく、出水ピーク時から減水期にかけて大きな変化がないためである。河床材料は上流域の滯筋で特に粗粒化しており、流路が移動しない規模の出水では、河床低下するためであった。

キーワード：常願寺川, 河床材料, 河床変動量, 掃流砂量, 数値解析

## 1. はじめに

常願寺川は、北ノ俣岳を源流とする一級河川で、勾配 1/30~1/1100 の急流河川である。図-1 に、常願寺川流域を示す。図より、河口から 21.5k の横江堰堤までが河川区間、横江堰堤より上流が砂防区間である。常願寺川流域は、かつて「暴れ川」と言われるほど土砂生産量が多く、土砂災害や水害による甚大な被害が発生していた。近年では、河川および砂防区間の整備により大きな災害は抑えられてきた反面、砂防堰堤等により上流からの土砂供給量が減少し、常願寺川河川区間では河川環境の変化が生じている。図-2 に、常願寺川河川区間における平均河床高の経年変化を示す。1947 年から 1980 年までは、全川に渡って河床低下が生じている。これは、図-3 に示す常願寺川における河道掘削量および砂利採取量の推移から、本期間にタワーエクスカータ等による河道掘削が活発に行われた影響である。近年の河床高の変化をより詳細に把握するために、図-4 に 1997 年を基準とした平均河床高変化量の経年変化を示す。図より、平成以降は、0.0 k から 10.0 k 区間では堆積傾向、11.0k より上流区間で河床低下傾向が続いている。そこで、本研究では、常願寺川河川区間の河床・流路変動特性を明らかにするため、現地データの整理および数値解析を行った。現地データの整理では、粒径の経年変化、水文データの整理を行い、現況の把握を行った。数値解析では、現地データを基にして流路変動を再現し、常願寺川河川区間の河床・流路変動特性の検討を行った。

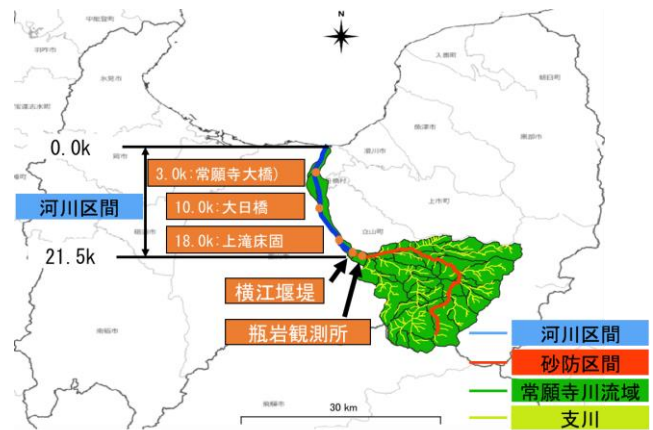


図-1 常願寺川流域

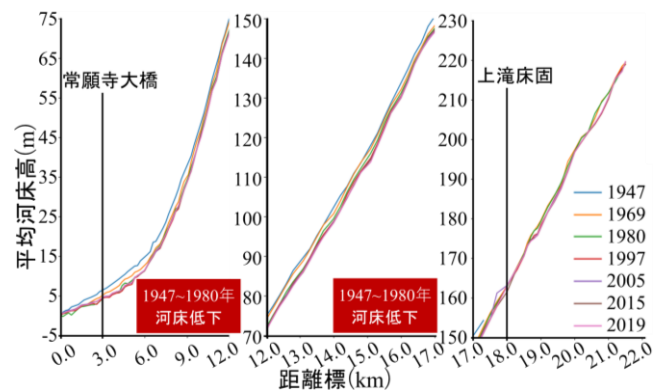


図-2 常願寺川河川区間における平均河床高の経年変化

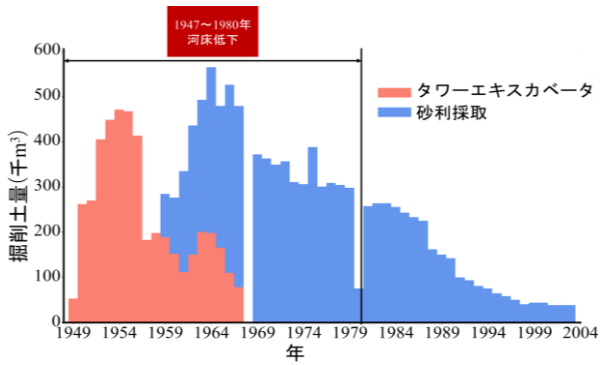


図-3 常願寺川での河道掘削量と砂利採取量の推移<sup>1)</sup>

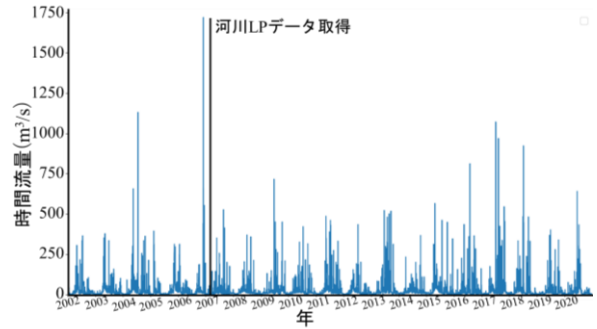


図-6 2002年から2020年までの時間流量  
(瓶岩観測所)

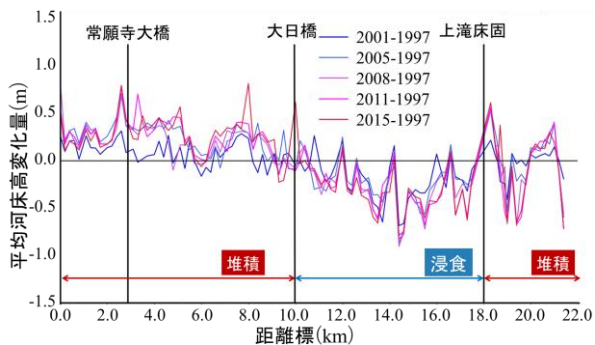


図-4 平均河床高変化量の経年変化 (1997年基準)

## 2. 研究方法

### 2.1 対象区間, 現地データ整理

本研究にて対象とする河川区間は、河口より 3.0 km に位置する常願寺大橋から上滝床固までの計 15 km である。図-5 に、対象区間における河床材料の縦断変化を示す。河道掘削量が多い期間 (1969 年～1979 年) は全川に渡って代表粒径が小さいが、掘削や砂利採取量が減った後は流程に沿って代表粒径が変化している。特に近年では、6.0 km までの区間で細粒化傾向、6.0 km より上流で粗粒化傾向にあることが分かる。図-6 に 2002 年から 2020 年までの期間における瓶岩観測所で観測された時間流量を示す。図より、2007 年出水後、富山河川国道事務所の航空測量による河川 LP データが取得されている。常願寺川での河川 LP データは、この 2007 年データの 1 回分のみである。

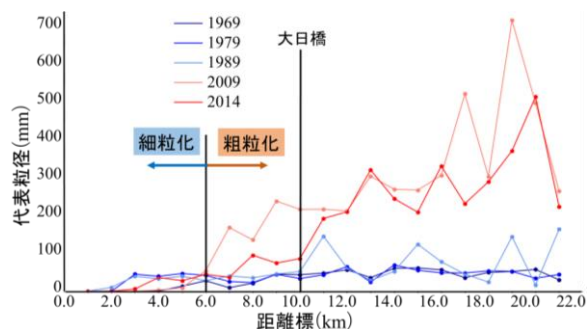


図-5 河床材料の縦断変化

### 2.2 数値解析

#### 2.2.1 モデルの概要

本研究では、非定常平面二次元河床変動解析である iRIC Nays2DH<sup>2)</sup>を用いた。本モデルは、一般曲線座標系で記述されるが、ここでは基礎式を確認するため、デカルト座標系での数式を示す。

#### 流れの基礎方程式

【連続式】

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

【運動方程式】

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D_y \quad (3)$$

ただし、

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$D_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_t h \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$D_y = \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_t h \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (7)$$

ここで、 $h$  : 水深、 $t$  : 時間、 $u, v$  :  $x, y$  方向の水深平均流速、 $g$  : 重力加速度、 $\rho$  : 水の密度、 $H$  : 水位、 $\tau_x, \tau_y$  :  $x, y$  方向の河床せん断力、 $C_f$  : 河床せん断係数、 $v_t$  : 渦動粘性係数、 $D_x, D_y$  :  $x, y$  方向の拡散項である。

河床底面摩擦係数  $C_f$  は次式で表される。

$$C_f = \frac{gn_m^2}{h^{1/3}} \quad (8)$$

$$n_m = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (9)$$

ここで、 $n_m$  : マニングの粗度係数、 $k_s$  : 相対粗度高さである。

混合粒径モデル

中央粒径 $d_m$ は次式で定義される.

$$d_m = \sum_{k=1}^n p_k d_k \quad (10)$$

ここで,  $n$ : 河床の粒径加積曲線の階級数,  $p_k$ : 河床全体に占める粒径階 $k$ の粒子の割合,  $d_k$ : 粒径階 $k$ の代表粒径である.

掃流砂量式

粒径階 $k$ ごとの全掃流砂量 $q_{bk}$ は芦田・江頭・劉の式<sup>3)</sup>により次式のように表される.

$$q_{bk} = 17p_{mk}\tau_{*ek}^{1.5} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}}\right) \sqrt{Sgd_k^3} \quad (11)$$

ここで,  $\tau_{*k}$ : 粒径階 $k$ の無次元掃流力,  $\tau_{*ck}$ : 粒径階 $k$ の無次元限界掃流力,  $p_{mk}$ : 交換層における粒径階 $k$ の含有率,  $K_c$ : 河床勾配の影響度合いを表す補正係数,  $S$ : 土砂の水中比重,  $\tau_{*ek}$ : 無次元有効掃流力で以下のように求める.

$$u_{*em}^2 = \frac{V^2}{\left(6 + 2.5 \ln \frac{h}{d_m(1 + 2\tau_{*m})}\right)^2} \quad (12)$$

$$\tau_{*ek} = \frac{u_{*em}^2}{sgd_k} \quad (13)$$

ここで, 下付き添え字 $m$ は平均粒径に対する物理量であることを意味する.

各粒径の無次元掃流力の算定には, 遮蔽効果を考慮する必要があり, Egiazaroff の式を修正した浅田の式<sup>4)</sup>を用い, 以下に示す.

$$\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} = \left[ \frac{\log_{10} 23}{\log_{10} \left(21 \frac{d_k}{d_m} + 2\right)} \right]^2 \quad (14)$$

ここで,  $\tau_{*cm}$ : 中央粒径の無次元掃流力で岩垣の式<sup>5)</sup>を用いて算定する. 全掃流砂量から $x, y$ 方向の掃流砂量の算定には渡邊の式<sup>2)</sup>を用いる.

$$q_{bkx} = q_{bk} \left[ \frac{u_b^x}{V_b} - \gamma \left( \frac{\partial z}{\partial x} + \cos \theta \frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] \quad (15)$$

$$q_{bky} = q_{bk} \left[ \frac{u_b^y}{V_b} - \gamma \left( \frac{\partial z}{\partial y} + \cos \theta \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] \quad (16)$$

ここで,  $V_b$ : 河床近傍の合成流速,  $\theta$ :  $x$ 軸,  $y$ 軸のなす角度,  $u_{bx}, u_{by}$ :  $x, y$ 方向の河床近傍の流速で水深平均流の流線の曲率より, 以下のように求める.

$$u_b^x = \widetilde{u}_{bx} \cos \alpha_s - \widetilde{u}_{by} \sin \alpha_s \quad (17)$$

$$u_b^y = \widetilde{u}_{bx} \sin \alpha_s + \widetilde{u}_{by} \cos \alpha_s \quad (18)$$

$$\widetilde{u}_{bx} = 8.5u_* \quad (19)$$

$$\widetilde{u}_{by} = -N_* \frac{h}{r} u_{bx} \quad (20)$$

ここで,  $\widetilde{u}_{bx}$ : 流線に沿った河床近傍の流速,  $\widetilde{u}_{by}$ :  $\widetilde{u}_{bx}$ に直行する流線に沿った河床近傍の流速,  $\alpha_s = \arctan u/v$ であり,  $N_*$ は7.0,  $r$ は流線の曲率である.

流砂連続式

河床の連続式は次式で表される.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \sum q_{bkx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sum q_{bky} \right) \right] = 0 \quad (21)$$

ここで,  $z$ : 河床高,  $\lambda$ : 河床材料の空隙率 (=0.4), 下付き添え字は $k$ 階層の粒径階の物理量であることを意味し,  $q_{bkx}, q_{bky}$ :  $x, y$ 方向の掃流砂量である.

2.2.2 計算条件・計算ケース

計算範囲は3.0kの常願寺大橋付近から18.0kの上滝床固までとし, 対象区間に約10m×5mの計算格子を作成した. 標高, 河床高には2007年度の河川LP測量によるDEMデータ(富山河川国道事務所提供)を用いた(低水路は水面高である). 河床材料は混合粒径とし, H21年度の調査データ(富山河川国道事務所提供)を用い, 粒度分布を下流端(3.0k)から6.0kまで, 7.1kから11.1kまで, それより上流端までと3区間に分けて変化させた(図-7). 河床の交換層の厚さは0.3m, 堆積層1層の厚さは0.8mと設定した. 計算には, 河川LPデータ取得後に生じた2009年6月出水(図-8)を用い, 700m<sup>3</sup>/s出水条件下(既往6位)での流路変動の再現, 河床変動特性の検討を行った.

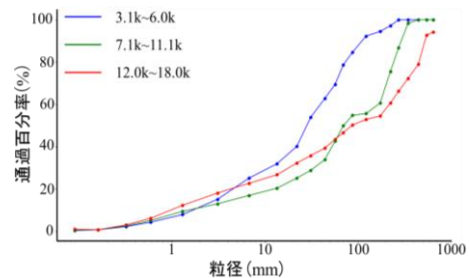


図-7 計算で用いた河床材料の粒度分布を示す

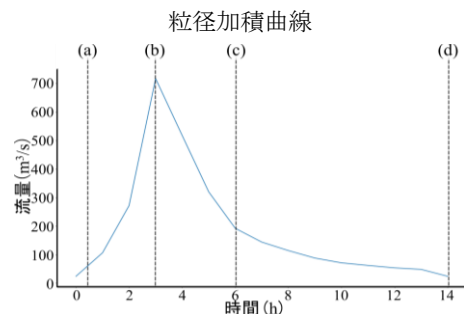


図-8 計算で用いたハイドログラフ

### 3. 計算結果

#### 3.1 精度の確認

図-9 に、Case1 における水深コンター図を示す。図より、計算開始時（図-9-a）と計算終了時（図-9-d）を比較すると、図中の赤丸区間、黄色区間で流路変動が生じていることが確認できる。

そこで、図-10 に、計算開始時の図-9-a の赤丸区間の水深コンター図と、計算終了時の図-9-d の赤丸区間を示す。出水前後の流路の位置から計算精度を確認するため、初期流路には 2007 年の実際の流路の位置を、計算終了時の流路には、2010 年の実際の流路の位置を重ねている。ここで、河川 LP データ取得から 2009 年 6 月出水までに平均年最大流量である 700m<sup>3</sup>/s 程度の大きな出水がなかったことから、2007 年から 2009 年間に大きな河川環境の変化はなかったと考えられる。図-10-a より、計算開始時の初期流路の位置（水深コンター図）と、2007 年の実際の流路の位置が、ある程度一致していることが分かる。また、図-10-b より、

計算終了時の流路の位置と、2010 年の実際の流路の位置が、おおむね一致しており、二股していた流路の右岸側の消失などが一致していることが分かる。続いて、図-11 に、計算開始時の図-9-a の黄丸区間と、計算終了時の図-9-d の黄丸区間の水深コンター図を示す。こちらも出水前後の流路の位置から計算精度を確認するため、計算開始時の流路に 2007 年の実際の流路の位置、計算終了時の流路に 2010 年の実際の流路の位置を重ねている。まず、図-11-a より、初期流路の位置（水深コンター図）と、2007 年の流路の位置がある程度一致していることが分かる。また、図-11-b より、計算終了時の流路の位置と、2010 年の流路の位置がおおむね一致しており、左岸側に新たな流路が形成され、二股した流路になったことが分かる。よって、数値解析による流路変動の結果と、実際の流路変動が凡そ一致しているため、本条件下での計算結果はある程度現況と一致しており、十分な再現性があると考えられる。

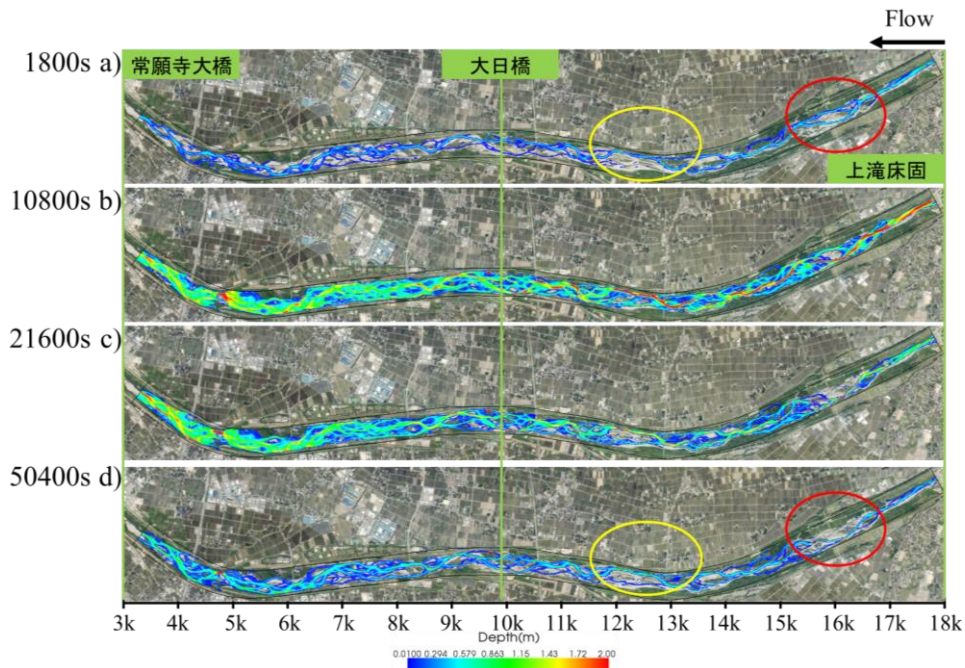


図-9 Case1 における水深コンター図（a~d は図-6 に示すハイドログラフの時刻）

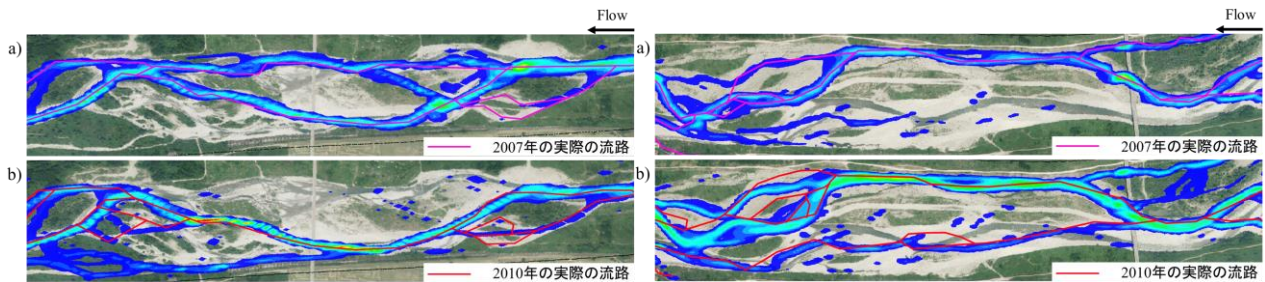


図-10 赤丸範囲における出水初期と終了時の流路の位置、  
a)出水初期の水深コンター図と 2007 年の流路を重ねた図、  
b)終了時の水深コンター図と 2010 年の流路を重ねた図

図-11 黄丸範囲における出水初期と終了時の流路の位置、  
a)出水初期の水深コンター図と 2007 年の流路を重ねた図、  
b)終了時の水深コンター図と 2010 年の流路を重ねた図

### 3.2 河床・流路変動特性

図-12 に Case1 における河床変動量コンター図を示す。図より、河床高の変化は、初期(図-12-a)からピーク流量時(図-12-b)よりも、流量減水時(図-12-c)に大きく変化したことがわかる。また、18.0k から 8.0k 区間では河床変動量が明瞭である一方で、8.0k から下流では河床変動量が不明瞭になることが分かる。これは、図-9 の水深コンター図から推察すると、上流域では出水時の滞筋が明瞭な反面、勾配が緩やかになる 8.0k より下流では、河道全面で比較的深く流れる傾向にあることによるものと考えられる。このような水深分布による流れの違いを把握するため、図-13 に流速コンター図を示す。まず、ピーク流量時(図-13-

b) より、勾配の急な上流域では滞筋が明瞭で、ここでの流速が大きいことが分かる。一方、下流域になるにつれ、流速は上流域と比べて小さい値となることが分かる。これは、上流域に比べて下流域は勾配が小さく、深くゆるやかに流れるためである。次いで、減水期((b) から (c))に着目する。図より、上流域では、滞筋の流速がピーク流量時に比べ急激に低下していることが分かる。一方で、下流域の流速は、上流域ほどピーク流量時との差が大きいことが分かる。これは、勾配の緩やかな下流域では、ゆっくりと流れるので流速の変化が起きにくく、上流域よりも変化に時間がかかると考えられる。

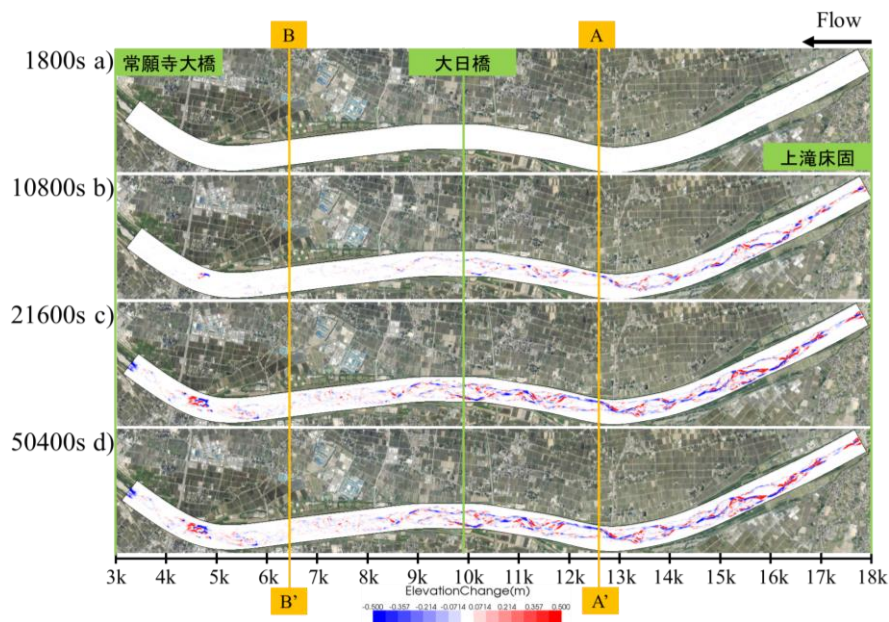


図-12 Case1 における河床変動量コンター図 (a~d は図-6 に示すハイドログラフの時刻)

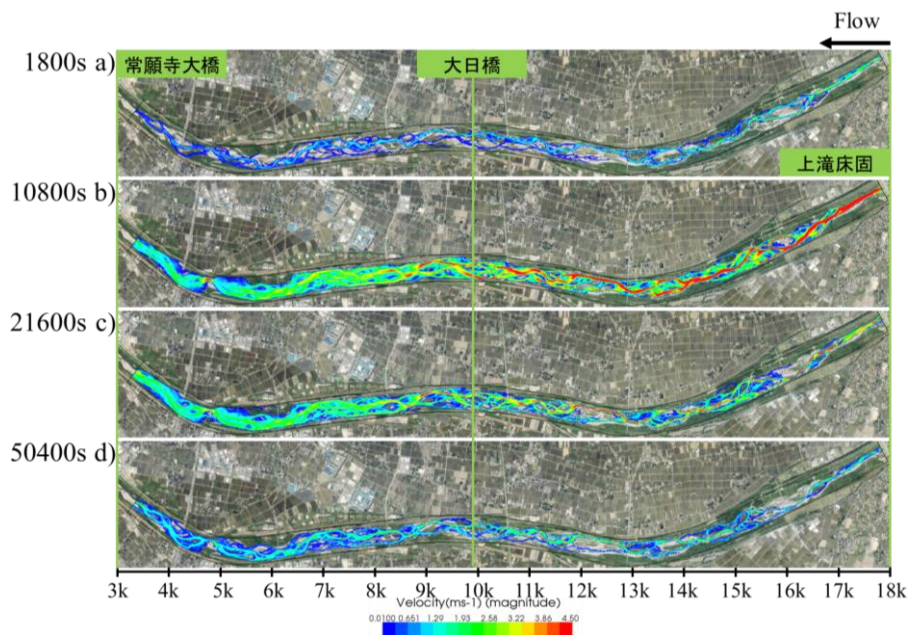


図-13 Case1 における流速コンター図 (a~d は図-6 に示すハイドログラフの時刻)

このような流速の違いが掃流砂量 (bedloadflux) に与える違いを把握するため、図-14 の掃流砂量コンター図を示す。図の時間変化から、掃流砂量のピークは流量ピーク時に現れることが分かる。また、ピーク流量時 (b) と、減水期 (c) との掃流砂量を比較すると、滞筋における掃流砂量が急激に減少していることが確認できる。一方で、下流域では上流域と同様に流量ピーク時に掃流砂量のピークが現れるものの、ピーク流量時においてもその値は明らかに小さいことが分かる。これより、下流域の河床材料の平均粒径は上流域よりも小さいものの、700m<sup>3</sup>/s では掃流力が小さいため掃流砂量がとても小さい値を示したとわかる。また、下流域において掃流砂量のピーク時 (b) と減水期 (c) を比較すると、上流域と異なり、掃流砂量に大きな差がないことが分かる。これが、下流域に向かうほど流砂量の時

間的・空間的な差が小さく、河床変動量が小さくなる理由である。なお、どの程度の掃流砂量の差が存在するかについて、図-15 に掃流砂の縦断変化の時間変化を示す。縦断変化に着目すると、図より、計算終了時 (50400s) を除き、上流域で掃流砂量が大きく、下流に向かうほど減少していくことが分かる。例として、A-A'断面、B-B'断面を挙げると、ピーク時において上流域の A-A'断面と、下流域の B-B'断面では、掃流砂量に5倍程度の差があることが分かる。続いて時間変化について着目すると、上流域では、ピーク流量時 (10800s) から減水期 (21600s) にかけて掃流砂量が急激に減少していることがわかる。このことから、出水中に移動していた多量の土砂は、上流域ほど急激に停止することが分かる。

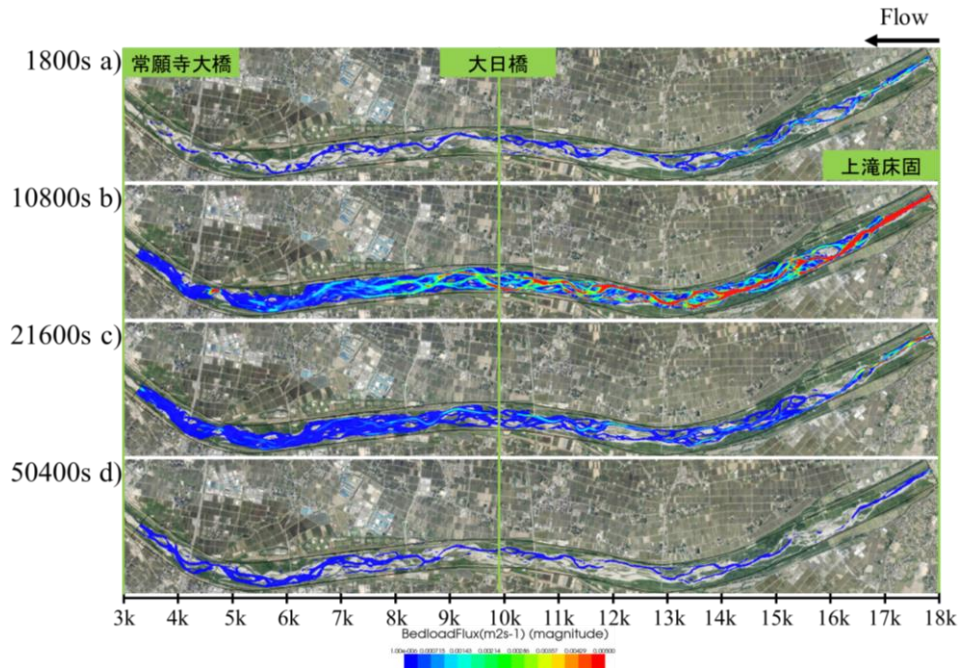


図-14 Case1 における掃流砂量 (bedloadflux) コンター図 (a~d は図-6 に示すハイドログラフの時刻)

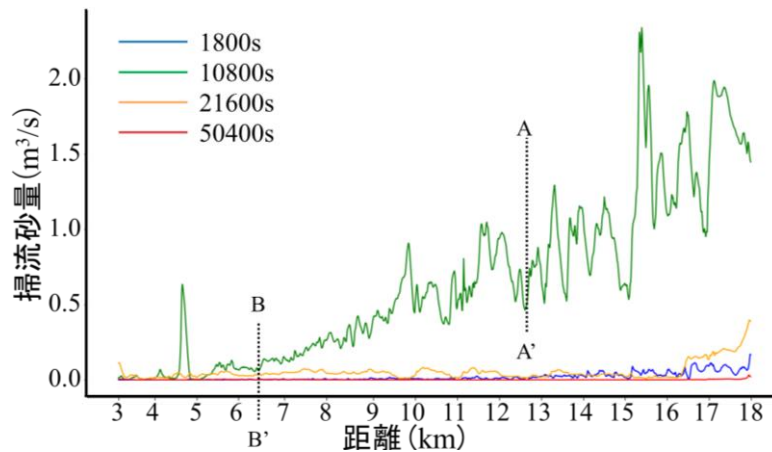


図-15 各時刻における掃流砂量の縦断変化

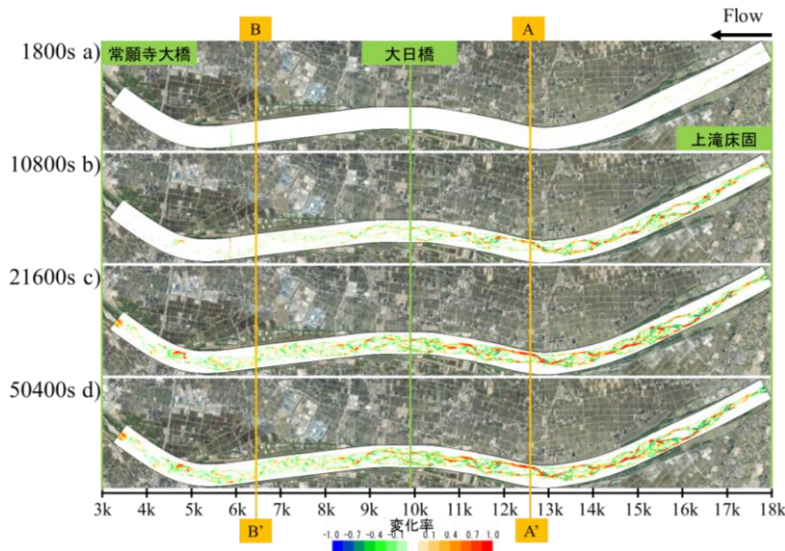
### 3.3 河床材料の変化

最後に、これらの違いが河床構成材料に与える影響を把握するため、**図-16**に Case1 における平均粒径変化率コンター図を示す。平均粒径の変化率 $d_{m\_rate}$ は次式で定義した。

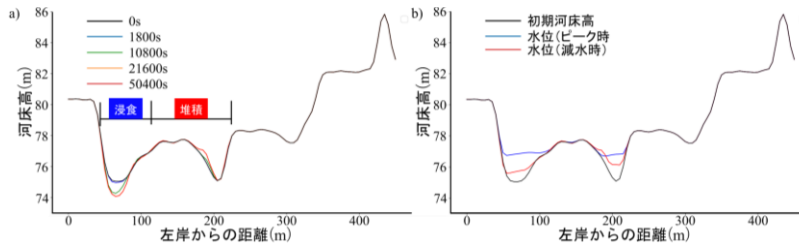
$$d_{m\_rate} = \frac{d_{m\_end} - d_{m\_initial}}{d_{m\_initial}} \quad (22)$$

ここで、 $d_{m\_rate}$ ：平均粒径の変化率、 $d_{m\_initial}$ ：計算開始時の平均粒径、 $d_{m\_end}$ ：各時刻における平均粒径である。図より、上流域では滞筋での粒径の粗粒化傾向が多くみられる。例えば、A-A'断面を例にとると、右岸側流路で粗粒化傾向が明瞭であることが分かる。これは、**図-9**の水深コンター図、**図-13**の流速コンター図から分かる滞筋の位置とならびに**図-12**の河床変動量コンター図より、河床低下している場所と一致していることが分かる。一方で、A-A'断面の左岸側流路ではわずかに細粒化傾向であることが分

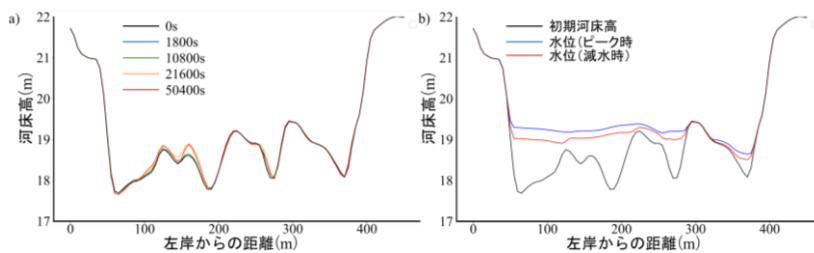
かる。**図-17**に A-A'断面における河床高の時間変化と水位の変化を示す。図より、粗粒化した領域は浸食された場所で、細粒化した領域は堆積した場所であることが分かる。一方で、**図-16**の平均粒径変化率コンター図において、より下流域を確認すると、8.0kより下流域では、明瞭な粗粒化・細粒化傾向は見られず、若干だが細粒化した領域が多いように見受けられる。そこで、上流域と同様に、**図-18**に B-B'断面における河床高の時間変化と水位の変化を示す。図より、河道の大部分が堆積している傾向に見られた。つまり、堆積した領域で細粒化傾向が見られると分かる。これは、土砂の細粒成分は、粗粒成分と比べ、小さい掃流力で移動することができるため、出水後半に堆積傾向になる場所の表層ほど細粒土砂が停止すると考えられるためである。



**図-16** Case1 における平均粒径変化率コンター図、赤)粗粒化、青)細粒化を示す (a~d は**図-6**に示すハイドログラフの時刻)



**図-17** A-A'断面における横断面の時間変化、a)河床高、b)水位



**図-18** B-B'断面における横断面の時間変化、a)河床高、b)水位

#### 4. 結論

本研究では、常願寺川における河床・流路変動特性について現地データの整理、数値解析を用いて検討した。以下に本研究で得られた主な結論を示す。

- 1) 砂利採取量の多い1969年から1979年の期間は、全川に渡って代表粒径が小さいが、砂利採取量が減少すると、流程に沿って代表粒径が変化している。特に近年では、0.0k から 6.0k 区間で細粒化傾向、6.0k から上流区間で粗粒化傾向にある。
  - 2) 数値解析により、700m<sup>3</sup>/s 出水条件下での流路変動を再現した。水深コンター図から、15.5k から 17.0k 区間で流路変動が生じていることが見られ、実際の流路と比較すると、概ね一致していることが確認された。これにより、計算結果がある程度現況と一致していることが示された。
  - 3) 河床変動量コンター図から、上流域では、河床変動量が明瞭である一方で、下流域では変動量が少なく不明瞭であることが確認された。これは、上流域では勾配が急で掃流砂量が多く、これがピーク流量時から減水期にかけて急激に減少するが、下流域では勾配が緩やかで、掃流砂量の時間変化が大きくないためであると考えられた。
  - 4) 平均粒径変化率コンター図から、上流域の滞筋にて粒径の粗粒化が、下流域では、細粒化する領域が多いことが確認できた。これは横断図から、浸食傾向にある領域では粗粒化、堆積傾向にある領域では、細粒化傾向にあることが確認された。
- 3) 芦田和男, 江頭進治, 劉柄義 (1991), 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第35巻, pp.383-390.
  - 4) 浅田宏, 石川晴雄 (1972), 水流による河床砂礫の分級機構に関する研究 (III), 電力中央研究所報告, 第71015号.
  - 5) 岩垣雄一 (1956), 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.

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、河川砂防技術研究地域課題分野【砂防】(代表: 藤田正治)、北海道河川財団(代表: 久加朋子)の支援を受けた。また、国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所より多くの資料をご提供いただいた。ここに深く感謝申し上げます。

#### 参考・引用文献

- 1) 白井芳樹, 成瀬龍也 (2018), 暴れ川と生きる【常願寺川治水叢書河川編】, 一般社団法人 北陸地方づくり協会, 159pp.
- 2) iRIC マニュアル, <https://i-ric.org/help/manual/> (2023/02/22 閲覧)



# Study on bed variation and channel morphodynamics of the Joganji River

Yuga Yamamoto, Tomoko Kyuka

(Department of Environmental and Civil Engineering, Faculty of Engineering)

