

安倍川洪水における掃流砂と浮遊砂の 非平衡運動による網状流路の発達

森本 有祐¹・竹村 吉晴²・福岡 捷二³・立松 明憲⁴

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

E-mail: a17.w64p@g.chuo-u.ac.jp

²正会員 中央大学研究開発機構 機構准教授 (同上)

E-mail: takemura@tamacc.chuo-u.ac.jp

³フェロー 中央大学研究開発機構 機構教授 (同上)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

⁴正会員 国土交通省 中部地方整備局 静岡河川事務所

(〒420-0068 静岡県静岡市葵区田町 3 丁目 108)

Email: tatematsu-a2ga@mlit.go.jp.

本研究は、石礫を含んだ広い粒度分布の河床材料からなる安倍川網状流路において、洪水流の三次元性に伴う掃流砂、浮遊砂の非平衡土砂移動機構及び洪水水中の滞筋の移動等を明らかにすることを目的としている。流れの解析は非静水圧分布を考慮した準三次元解析である Q3D-FEBS 法、掃流砂の運動には、修正長田・福岡モデル、浮遊砂の運動には後藤・福岡モデルを用いた新しい河床変動解析法を適用し、網状流路の河床の変形について実測値と比較している。その結果、本解析法が網状河川安倍川の洪水流河床変動解析に有効な手段を与えることを示している。

Key Words: gravel bed, braided river, non-equilibrium bed variation, flood flows, Q3D-FEBS

1. 序論

安倍川は静岡市を流れる扇状地河川であり、中下流域では石礫を中心とする広い粒度分布で構成される網状流路が広がっている。安倍川では、河岸侵食や下流域での河床上昇等が治水上の課題が生じており、洪水時の網状流路の発達と土砂移動の解明が求められている。

洪水時の河床変動は、河床砂礫の運動が非平衡となり、空間的な流砂量の分布に差が生じることで起こる現象である。従来の網状流路の解析では、流れの平面二次元解析を行い、掃流砂の平衡流砂量式に水深平均流速の曲率による二次流の発生や局所河床勾配の影響を付与することで、流砂の非平衡性を考慮してきた¹⁾²⁾。倉林・清水¹⁾は、水路幅と水路勾配が一様でかつほぼ均一砂からなる実験水路での網状流路の発達・減衰過程等を上述の解析法により説明できることを示した。さらに竹林ら²⁾は、混合粒径を考慮した数値解析を行い、非常流と定常流での滞筋や砂州上での粗粒化・細粒化の違いについて検

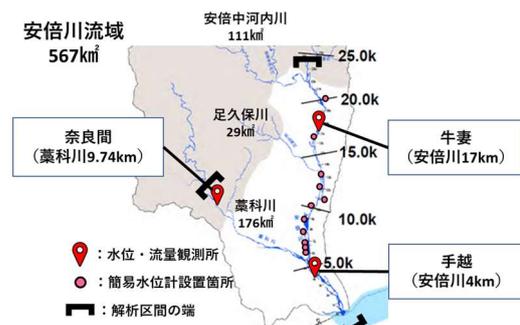


図-1 安倍川の流域図

討している。これに対し Lotsari et al.³⁾は、Tana River 下流域の 5 km 区間において、網状流路の変化を詳細に調査し、倉林・清水とほぼ同様の解析法で再現計算を行っている。彼らの解析は、対象区間全域での 1 年間の総堆積量及び総洗掘量の実測値を説明できたものの、滞筋位置の変化を十分に再現できず課題とされている。このような平面二次元解析と平衡流砂量式での非平衡性の考慮では、網状流路のような大きな地形変化に伴う河道の解析には不

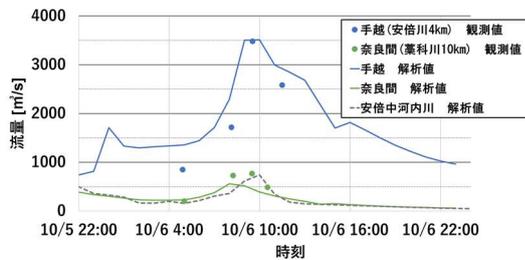


図-2 観測と解析の流量ハイドログラフの比較

十分であり、非平衡性は流れと土砂の運動方程式の中で考慮されなければならないと考える。

網状流路は、地形が複雑かつ空間的に大きく変化し、そこに洪水流の非定常性や河床変動の影響が重なることで、流れの三次元構造が複雑になる。さらに河床を構成する材料の粒径の場所的な変化や洪水流に対する土砂の追従の仕方が異なることにより、流砂の非平衡性が強化されることになる。特に、石礫から砂まで幅広い粒径で構成される急流河川安倍川の網状流路の場合は、時間・空間的に変化する流れの状態と粒径の大きさとの関係から、土砂は掃流砂となったり浮遊砂となったりして相互に影響を及ぼしながら移動することになる。浮遊砂は、掃流砂に比べ川幅の変化や河床地形等のより大きいスケールでの地形変化の影響を強く受けるため、流れの三次元性と掃流砂・浮遊砂の非平衡運動と相互作用を適切に取り扱う必要がある。

このような理由から著者らは、安倍川網状流路における洪水時の土砂移動機構の解明のためには、流れの三次元性や掃流砂・浮遊砂の非平衡性の影響が取り込まれた一般性の高い流れと土砂の運動方程式系を観測水面形の時系列データを境界条件として解く⁴⁾ことが必要であるとの認識で研究を進めてきたが⁵⁾、流れの三次元性や浮遊砂の取り扱い等に課題を残していた。本研究は、流れの解析には非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)を用い、土砂移動の解析に修正長田・福岡モデル、掃流砂・浮遊砂間の相互作用を考慮した浮遊砂モデルによる土砂移動の非平衡性を取り込んだ Gotoh & Fukuoka⁶⁾による解析モデルを適用し、安倍川の洪水中の網状流路の発達や土砂移動の機構の解明を行っている。同様の研究には、遠賀川で低水路際での浮遊砂の巻き上がりによる堆積について、非平衡掃流砂、浮遊砂の運動を定式化し説明を行った長谷部ら⁷⁾の研究がある。

2. 解析条件と解析手法

(1) 解析条件

解析対象洪水は、近年の主要洪水である平成 26 年 10 月の台風 18 号洪水とした。図-1 と図-2 に安倍川流域図と各観測所での観測流量ハイドログラフを示す。基準地

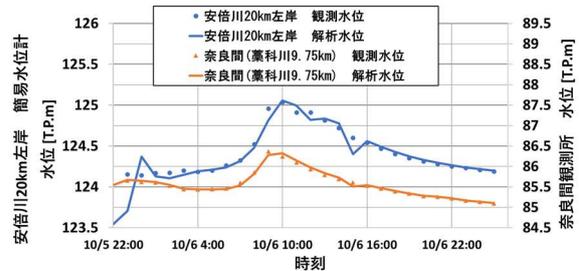


図-3 上流端境界条件の水位ハイドログラフ

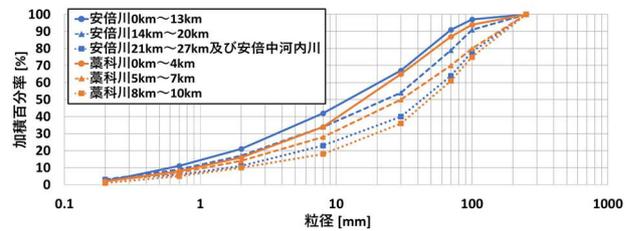


図-4 解析に用いた河床材料粒度分布

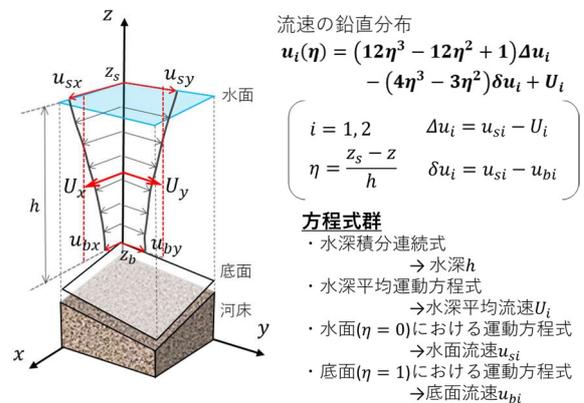


図-5 Q3D-FEBS法の模式図と方程式群

点である手越 (安倍川 4km) 観測所において、ピーク流量は $3480\text{m}^3/\text{s}$ を記録している。解析対象区間は、本川は河口から 22km 区間とし、支川藁科川は合流点～10km 区間、支川安倍中河内川は合流点～5km 区間とした。上流端境界条件には、図-3 に示す安倍川 20km 左岸の観測水位ハイドログラフ、藁科川 9.75km (奈良間) の観測水位ハイドログラフを与えた。安倍中河内川の上流端境界条件には、流出解析で求めた流量ハイドログラフ (図-2) を与えた。下流端境界条件には焼津験潮場の潮位ハイドログラフを与えた。解析で得られる時系列水面形を、痕跡水位や簡易水位計による観測時系列水面形がほぼ一致するように決めることで、多くの河川で洪水流や河床変動をほぼ再現できる⁴⁾。安倍川でもこの方法を用いる。粗度係数は解析区間全域において $0.025\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ を用いた。解析に用いた河床材料粒度分布を図-4 に示す。安倍川、藁科川は平成 16 年度～平成 26 年度の河床材料調査結果に基づいて縦断的に区切って設定した。安倍中河内川については安倍川 22km 右岸側における河床材料調査結果を基に与えた。洪水前の地形は、平成 25 年度の LP 測量データ、横断測量データに基づいて与えた。

安倍川、藁科川、安倍中河内川の上流域からの流入土砂量は、解析区間上流端から平衡流砂量式で求めた掃流

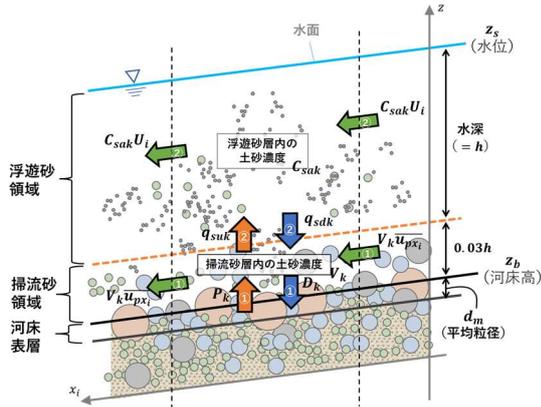


図-6 河床変動解析法のご概念図

砂量を流入させている。水制工は複数地点で設置されている。計算では水制の配置と高さを地盤高として与え、そこでの地盤高は変化しないものとして考慮した。

(2) 解析手法

流れの解析は竹村・福岡⁸⁾の Q3D-FEBS を用いた。模式図と方程式群を図-5 に示している。この解析法では流速の鉛直分布は水面、底面、水深平均流速の条件から得られる 3 次関数を仮定している。そして水深平均流速、水面流速、底面流速はそれぞれの運動方程式を解くことで求めている。

河床変動解析法のご概念図を図-6 に示す。掃流砂量と河床変動は、修正長田・福岡モデル⁹⁾を用いて解析した。この解析法では、掃流砂領域における各粒径の流砂の体積は非平衡であることから以下の式で解析を行っている。

$$\frac{\partial V_k}{\partial t} + \frac{\partial V_k \bar{u}_{pxi}}{\partial x_i} = P_k - D_k + q_{sdk} - q_{suk} \quad (1)$$

ここに、 $k=1\sim 8$ ：各粒径を示す番号、 $i, j=1, 2 (x_1=x, x_2=y)$ 、 V_k ：単位面積当たりの掃流砂層内の粒径 k の粒子の流砂体積、 $\bar{u}_{px}, \bar{u}_{py}$ ： x, y 方向への粒径 k の粒子の平均移動速度、 P_k ：単位面積及び単位時間当たりの粒径 k の粒子の離脱土砂量、 D_k ：単位面積及び単位時間当たりの河床への粒径 k の粒子の堆積土砂量、 q_{sdk} ：浮遊砂領域から掃流砂領域へ沈降してくる粒径 k の粒子の土砂量、 q_{suk} ：掃流砂領域から浮遊砂領域へ浮上する粒径 k の粒子の土砂量である。平均粒子移動速度は、縦横断勾配を有する河床面において、以下の式を用いて Saltation 解析を行うことで求める。

$$\begin{aligned} & (\rho_s + \rho C_m) \alpha_3 d_k^3 \frac{\partial u_{pki}}{\partial t} \\ & = -\rho \alpha_3 d_k^3 g_{xi} - \alpha_3 d_k^3 \left(\rho g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{\partial p'_b}{\partial x_i} \right) \\ & + \frac{\rho C_D \alpha_2 d_k^2}{2} (u_{fk, xi} - u_{pki}) \sqrt{(u_{fk, xj} - u_{pkj})^2} \quad (2a) \end{aligned}$$

$$u_{fk, xi} = \frac{u_{b, xi}}{\sqrt{u_{b, xj}^2}} u_* \frac{1}{\kappa} \log \left(30.2 \frac{z - z_{sd}}{d_r} \right) \quad (2b)$$

ここに $i, j=1, 2, 3 (x_1=x, x_2=y, x_3=z)$ 、 ρ_s ：砂粒子の密度、 ρ ：水の密度、 u_{pki} ：粒子速度、 C_m ：仮想質量係数、 g_{xi} ：重力ベクトル $(0, 0, g)$ 、 α_2, α_3 ：粒子の形状係数 $(=\pi/4, \pi/6)$ 、 d_k ：粒径、 C_D ：抗力係数 $(=0.5)$ 、 $u_{b, xi}$ ： x_i 方向の底面流速、 d_r ：平均粒径、 z_{sd} ：砂面高、 p'_b ：底面での非静水圧である。

非平衡浮遊砂量、浮遊砂濃度は、Gotoh & Fukuoka⁹⁾の乱れを考慮した解析モデルを適用した。浮遊砂濃度の計算式は以下の連続式によって解析を行っている。

$$\frac{\partial C_{sak} \Delta h_s}{\partial t} + \Delta h_s \frac{\partial (C_{sak} U_i)}{\partial x_i} = q_{suk} - q_{sdk} \quad (3)$$

$$q_{suk} = C_{bk} w_{suk}, \quad q_{sdk} = C_{sak} w_{sdk} \quad (4)$$

ここに、 C_{sak} ：水深平均浮遊砂濃度、 Δh_s ：浮遊砂領域の高さ、 C_{bk} ：掃流砂濃度 $(=V_k/\Delta h_b)$ 、 Δh_b ：掃流砂領域の高さ(従来の浮遊砂解析の基準点高¹⁰⁾を目安に $0.03h$ に設定)、 w_{suk}, w_{sdk} ：乱れを考慮して解析した鉛直上、下方向の粒子速度である。 w_{suk}, w_{sdk} は以下の式を用いて解析する。

$$\begin{aligned} & \alpha_3 (\rho_s + C_m \rho) d_k^3 \frac{\partial w_{spk}}{\partial t} = -\alpha_3 (\rho_s - \rho) g d_k^3 \\ & = \frac{1}{2} \alpha_2 C_D \rho d_k^2 (\bar{w} + w' - w_{spk}) |\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' - \mathbf{u}_{spk}| \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、 w_{spk} ：鉛直方向の浮遊砂粒子速度、 \mathbf{u}_{spk} ：浮遊砂粒子速度ベクトル、 \bar{w} ：粒子周辺の鉛直方向流速、 \mathbf{u} ：粒子周辺の流速ベクトルである。“ $\bar{\quad}$ ”はレイノルズ平均値、“ $'$ ”は乱れ成分を表している。流速の乱れ成分 \mathbf{u}' は、正規分布 $(N(\sigma, \mu), \sigma^2 = \overline{u'_i u'_i}, \mu = \bar{u}_i)$ に従うと仮定する。式(5)を 1 秒間計算し、これを 5 回繰り返した平均値を求め、式(4)に用いる鉛直方向粒子速度とする。 $\overline{u'_i u'_i}$ ($i=1, 2, 3$) は乱れの等方性を仮定し、 $\overline{u'_i u'_i} = 2/3 k_b$ (k_b ：乱れエネルギー)としている。

安倍川中下流域の河道では、石礫から砂まで含んだ広い粒度分布で構成されている。洪水時に掃流砂になるか浮遊砂になるかは、図-6 に示す掃流層内の流れの状態と粒径の大きさによって時間的及び場所的に変化する。このことを考慮していることが本研究の大きな特長である。

3. 解析結果と考察

(1) 流量ハイドログラフの解析結果

図-2 に安倍川 4km、藁科川 9.75km の観測所における浮子観測による流量ハイドログラフと解析値の比較を示している。手越 (安倍川 4km) における流量ハイドログラフは増水期、減水期で若干解析の方が大きいものの、ピ

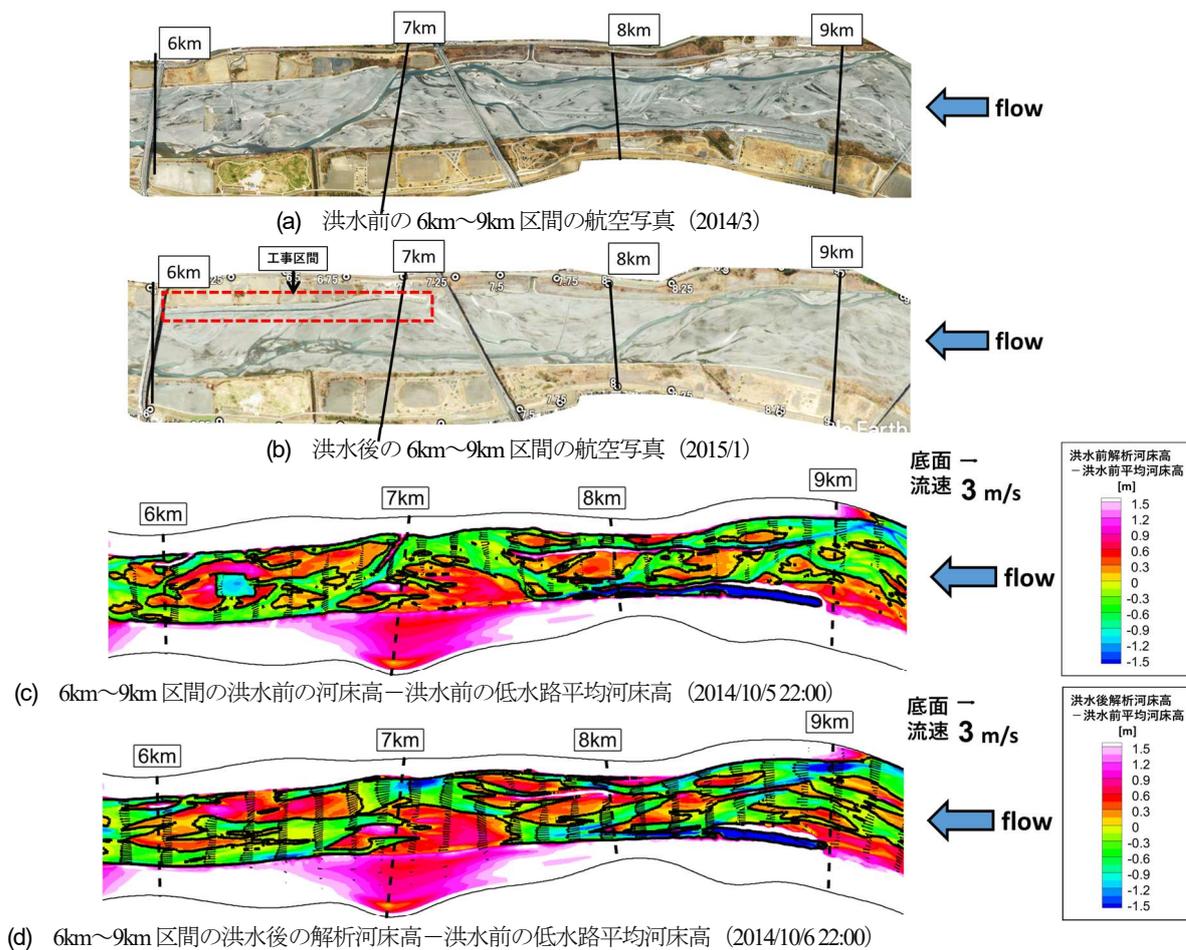


図-7 洪水による河床変動の解析結果と実測の比較

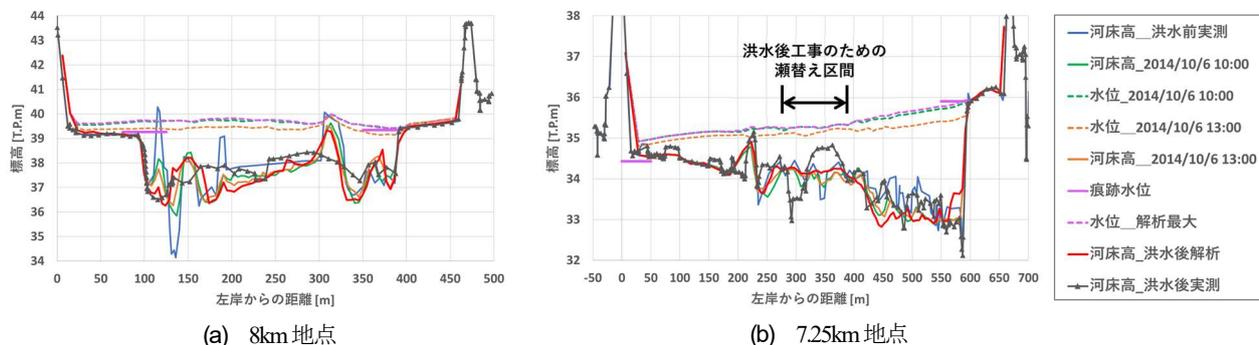


図-8 安倍川 8km 地点と 7.25km 地点の横断形状の解析値と観測値の比較

ーク流量及びハイドログラフの波形はおおむね一致している。奈良間（藁科川 9.75km）における流量ハイドログラフは全体的に解析の方が高くなっている。網状流路は比較的水深が浅く、複雑な河床形状を有しているために縦横断的に水位差や流速差が大きくなりやすい。このため、浮子による流量観測の精度は低いと考えられている。網状流路の流量観測をどうするかは大きな技術課題である。本解析法の信頼度が高まれば、洪水流河床変動解析法を用いて、流量ハイドログラフを求めることも考えられる。

(2) 河床変動解析結果

図-7(a)は洪水前の 6km～9km 区間の航空写真、図-7(b)

は洪水後の同一区間における河道の航空写真を示している。これらによると、洪水前は 7km～9km 区間において右岸沿いに大きな滞筋が形成され、7km 左岸には砂州が形成されていることが分かる。洪水後は、8km の直上流で右岸から左岸へ蛇行するように滞筋が形成されている。7km～6km の左岸沿いに滞筋が見えるが、これは航空写真撮影時、赤い点線枠で示された 7km 低水路右岸の工事のため瀬替えを行ったからである。

図-7(c)に洪水前、図-7(d)に洪水後の解析地形のコンター図を示す。安倍川は急流河川のため河床高をそのまま用いてコンター図を作成すると、滞筋や砂州の位置が分かりづらい。このため、図-7(c)、(d)では、洪水前と洪水後の河床高から 1 km の範囲で移動平均した洪水前の低水

路平均河床高を差し引くことで、各場所の相対的な河床の高さを表現した。コンターの値が 0m の場所を黒の実線でつないでおり、0m より低い場所が滞筋、高い場所が砂州の位置を表している。これらによると、解析では洪水によって 8km の直上流で右岸から左岸に向かって蛇行する滞筋が形成されている。図-8(a)に 8km の横断形状の解析値と観測値の比較を示している。解析は、洪水後の左岸際水衝部の実測地形を良く説明できている。次に 7km 付近に着目すると、図-7(c), (d)の解析結果では、洪水前後で右岸に水衝部、左岸に砂州が維持されていることが分かる。図-8(b)に 7.25km の横断形状の解析値と観測値の比較を示している。瀬替えした区間を除けば、解析は実測の河床地形を良く説明できていることが分かる。

(3) 洪水時の滞筋移動機構

ここでは、洪水時の滞筋の移動を、解析結果から考察し、安倍川の河床変動を評価する上で考慮すべき点を挙げる。図-9(a)に安倍川 8km~8.5km 区間の 2014/10/5 22:00 (増水期)における解析地形、図-9(b)にその 12 時間後 (ピーク時)における解析地形を同様の方法で示している。コンターの値が 0m の場所を黒の実線でつないでおり、それより低い場所が滞筋、高い場所が砂州の位置を表している。8.25km~8.5km の河道中央に位置している砂州が洪水時に前進し、その砂州の直下流にある滞筋も移動している。

図-10 は、洪水ピーク時に 6km~10km の各断面を通過する解析掃流砂量(実線)、解析浮遊砂量(点線)の縦断分布を示している。粒径 8mm~70mm の礫は主に掃流砂として移動している。一方、粒径 0.2mm~2mm の砂は浮遊砂と掃流砂に分かれて移動していることが分かる。図-11 に図-9(b)と同じ場所、同じ時間の粒径 70mm の礫の単位幅掃流砂量ベクトル、図-12 に粒径 0.7mm の砂の単位幅浮遊砂量ベクトルの平面分布を示す。黒の実線は、図-9(b)に示した滞筋と砂州の境界線である。掃流砂量は砂州上に乗上げる箇所で大くなり、砂州から滞筋へ落ち込む箇所で減少する傾向が見られる。これに対し、浮遊砂は砂州よりも滞筋のある箇所でも多く流れている。このように、洪水時の掃流砂と浮遊砂の挙動の違いは洪水流に対する土砂の追従の仕方の差、すなわち掃流砂と浮遊砂の非平衡性の違いによって起こっており、これらが網状流路の形や土砂移動機構に重要な役割を果たしていると考えられる。

図-13 は、安倍川 8km~8.5km において解析的に求められた洪水後の河床表層の平均粒径の平面分布である。図-13 の区間では洪水前の平均粒径は一律に 48mm を与えている。図-12 で見られたように、解析では浮遊砂は流れの速い滞筋を中心に流下するが、図-13 に示すように、洪水後の滞筋での平均粒径は粗くなっている。これは、

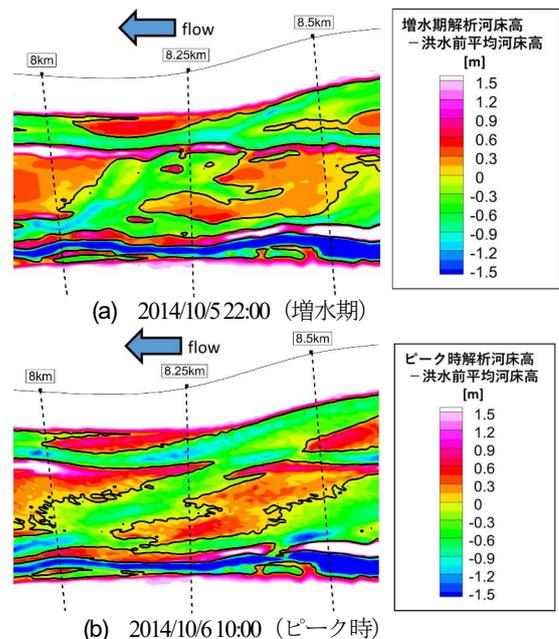


図-9 安倍川 8km~8.5km における増水時とピーク時の滞筋と砂州の位置

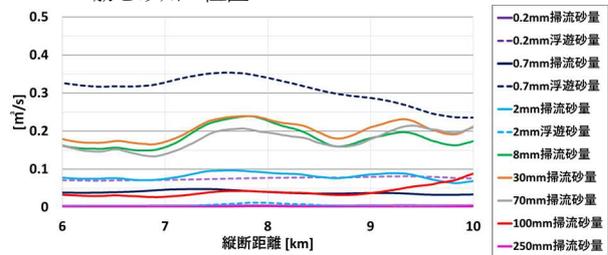


図-10 安倍川 6km~10km における洪水ピーク時の解析による掃流砂量、浮遊砂量の縦断分布

図-11 に示したように浮遊砂と共に掃流砂が滞筋を流れており、最終的には比較的大きな石礫が河床に残り粗粒化したものと考えられる。

異なる時間で図-9~図-13 に相当する解析結果を重ね合わせることによって、安倍川網状流路の発達過程に及ぼす掃流砂・浮遊砂の非平衡運動の重要性がさらに理解可能になるとと思われる。

4. 結論

本研究では、地形が複雑かつ空間的に大きく変化し、幅広い粒径集団で構成される安倍川洪水時の網状流路の土砂移動機構の解明には、流れの三次元性や掃流砂・浮遊砂の相互作用と非平衡性を取り込んだ一般性の高い流れと土砂移動を表現する方程式系に基づく洪水流・河床変動解析を行うことが重要であるとの考えのもとに、新しい解析を展開した。その結果、本モデルは安倍川洪水時に起こっている網状流路の大規模な変化機構が説明可能であることを示した。

安倍川は、急流河川のため洪水時の水深が浅く、水面

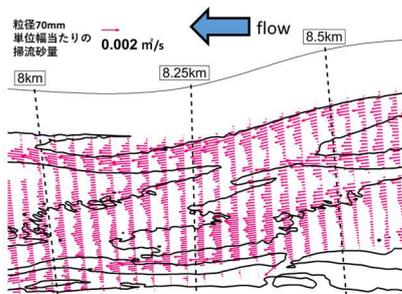


図-11 安倍川 8km～8.5km における洪水ピーク時の粒径 70mm の掃流砂量分布

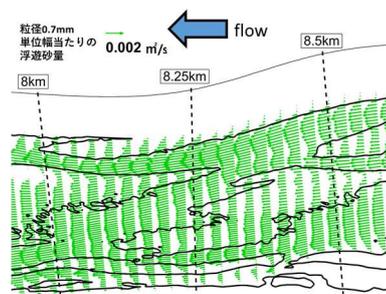


図-12 安倍川 8km～8.5km における洪水ピーク時の粒径 0.7mm の浮遊砂量分布

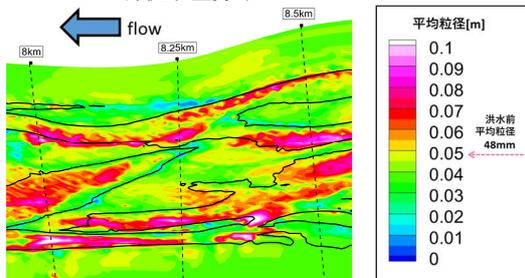


図-13 安倍川 8km～8.5km における洪水後の河床表面における解析平均粒径の分布

に河床の変化が反映し易い。今後、国土交通省静岡河川事務所と共同で橋梁の上等から洪水時の水面の様子や河床が水面下に没する範囲等を時間的、空間的に撮影し、これらの画像データと本解析法による流れや土砂移動の解析結果を照らし合わせることで、網状流路の現象説明および本解析法の信頼度のさらなる向上に努めるつもりである。

参考文献

- 1) 倉林弘志, 清水康行: 浮州の形成を考慮した網状流路における河床変動計算, 水工学論文集, 第46巻, pp.743-748, 2002.
- 2) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士: 混合砂河床における網状流路の数値解析, 水工学論文集, 第47巻, pp.631-636, 2003.
- 3) Lotsari, E., Wainwright, D., Corner, G.D., Alho, P. and Käyhkö, J.: Surveyed and modelled one-year

morphodynamics in the braided lower Tana River, *Hydrological Processes*, Vol.28, pp.2685-2716, 2014.

- 4) 福岡捷二: 洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見えるか—, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol73, No.4, I 355-I 360, 2017.
- 5) 長田健吾, 福岡捷二, 岡田昌之: 石礫河川の二次元河床変動解析法を用いた安倍川網状流路の数値解析, 水工学論文集, 第54巻, pp.769-774, 2010.
- 6) Gotoh, T. and Fukuoka, S.: Development of bed variation calculation method considering nonequilibrium sediment motion and interaction between bed load and suspension: application to river mouth sandbar with large-scale topographic changes due to flood, 22 *IAHR-APD Congress, Sapporo*, 2020.
- 7) 長谷部夏希, 山口広喜, 後藤岳久, 福岡捷二: 船底型河道における低水路と高水敷の境界付近での細粒土砂の堆積機構—安定な船底型河道の設計に向けた検討—, 河川技術論文集, 第27巻, pp.463-468, 2021.
- 8) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.
- 9) 竹村吉晴, 久保宜之, 岡田将治, 福岡捷二: 洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構に関する研究, 河川技術論文集, 第26巻, pp.669-674, 2020.
- 10) 河村三郎: 土砂水理学1, 森北出版, 1982.

(Received June 30, 2021)
(Accepted September 3, 2021)

DEVELOPMENT OF BRAIDED CHANNELS BY BED LOAD AND SUSPENDED LOAD IN THE GRAVEL BED OF THE ABE RIVER DUE TO FLOOD FLOWS

Yusuke MORIMOTO, Yoshiharu TAKEMURA,
Shoji FUKUOKA and Akinori TATEMATSU

The braided stream of the Abe River is considered to be formed by the non-equilibrium motion of the bed load and suspended load, which change significantly in time and space due to the complex riverbed topography of the braided channels. This paper presents the bed variation mechanism of braided bars in the Abe River by calculating the three-dimensional flows and non-equilibrium motion of the bed load and suspended load based on the time series data of the observed water surface profiles of the large flood in 2014. The calculation results could well explain the changes in mainstream positions due to the movement of the braided bars.