

船底形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 —安定な船底形河道の設計に向けた検討—

SEDIMENTATION MECHANISM OF FINE SEDIMENT NEAR THE BOUNDARY
BETWEEN MAIN CHANNEL AND FLOOD CHANNEL
IN THE SHIP-BOTTOM-SHAPED CHANNEL

長谷部夏希¹・山口広喜²・後藤岳久³・福岡捷二⁴

Natsuki HASEBE, Hiroki YAMAGUCHI, Takahisa GOTOH and Shoji FUKUOKA

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)

²非会員 国土交通省 九州地方整備局 遠賀川河川事務所 調査課長
(〒822-0013 福岡県直方市溝堀1丁目1-1)

³正会員 博士(工) 中央大学研究開発機構 機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13-27)

⁴フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 機構教授 (同上)

The Onga River was repaired from compound channels to ship-bottom-shaped channels for the increase in flood discharge capacity and river environments. However, sediments depositions of fine sediments have occurred near the boundary between the main channel and the flood channel in the ship-bottom-shaped channel. In this study, we developed the new calculation model for suspended sediments based on the quasi-three-dimensional flow calculation model introducing the turbulent kinetic energy transport equations near the river beds. The calculation model clarified that the sedimentations were mainly caused by mainstreams flowing into the flood channels of the inner side around the time of the peak discharge in the gentle meander sections. These results indicated necessities of the considering the cross-sectional shapes and the main channel alignments integrally for designs of the ship-bottom-shaped channels.

Key Words : *ship-bottom-shaped channel, sedimentation mechanism, suspended load, secondary flow, Onga River*

1. 序論

福岡県を流れる遠賀川では近年大規模な出水が頻発しており、たびたび最高水位を更新するとともに浸水被害も発生し、流下能力の確保が求められている。そのため遠賀川では、複断面河道の高水敷を緩やかな傾斜で掘削することで河積を増大させる、船底形断面河道への改修が進められている。船底形断面形は、低水路と高水敷の境界を連続的に変化させたものであり、治水だけではなく環境や景観にも優れた断面形であると言われている¹⁾。一方で、船底形河道の低水路と高水敷の境界付近には細粒土砂が堆積しており、土砂堆積による流れの変化や高

水敷の樹林化などが懸念されている。よって、土砂堆積が生じにくく、管理のしやすい船底形河道設計法の確立が求められている。

笹木らは、複断面河道と船底形河道の流速分布や河床変動特性を比較し、船底形河道への改修効果を明らかにしている²⁾。しかし、低水路と高水敷の境界付近における細粒土砂の輸送・堆積現象については明らかでない。

本研究では、準三次元洪水流解析法と改良を加えた浮遊砂の解析法により、船底形河道における流れと河床変動を解析し、低水路と高水敷の境界付近の細粒土砂の堆積機構を明らかにすることを目的とする。

2. 船底形河道への改修とその後の土砂堆積

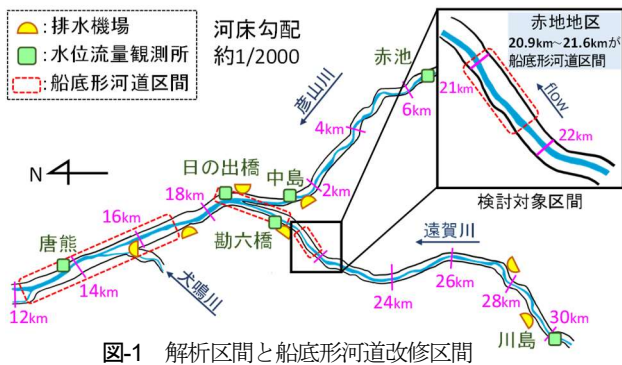


図-1 解析区間と船底形河道改修区間

遠賀川の赤地地区では、平成21年から平成24年にかけて、20.9km～21.6kmの区間で複断面河道から船底形河道への改修が行われた(図-1)。写真-1は河道改修後の赤地地区の航空写真、図-2は船底形河道への改修が行われた21.4kmの横断形状の経年変化を示し、図-3は低水路河岸付近の拡大図を示す。写真-1及び図-3に示す①～③の地点は、図-4に示す①～③の河床材料採取地点である。低水路と高水敷の境界付近に細粒土砂の堆積が生じている。21.4km地点においては、平成25年の横断面形と令和元年の横断面形を比較すると、約90cmの堆積が生じている(図-3)。図-4は低水路の河床材料と高水敷河岸際の堆積土砂の粒度分布を示している。低水路河床の平均粒径は2～3mm程度の砂礫である。一方、顕著に堆積している低水路と高水敷の境界付近(①)では、平均粒径が0.3mm程度の細砂であることが分かる。高水敷の中央部(②)や堤防側(③)の堆積土砂は、平均粒径が主に0.02～0.04mm程度のシルトである。

3. 解析方法と解析条件

(1) 洪水流解析

低水路と高水敷の境界付近における細粒土砂の堆積機構を明らかにするためには、二次流場と低水路と高水敷の境界付近の乱れ場を精度よく解析し、細粒土砂の巻き上げや河岸付近への輸送を見積もる必要がある。そのため洪水流の解析は、浅水流方程式と水深積分渦度方程式により流れの三次元性を解析することができるGBVC法(一般底面流速解析法)³⁾を用いた。さらに、水深平均・水表面の乱れエネルギー輸送方程式に底面での乱れエネルギー輸送方程式(式(6))を付加し、三次元流れと乱れエネルギーの分布を計算している。図-5は本解析における流速と乱れエネルギーの鉛直分布を示し、以下の式(1)、式(2)に示す三次関数で定義している。

$$\bar{u}_i(\eta) = \Delta \bar{u}_i(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta \bar{u}_i(-4\eta^3 + 3\eta^2) + \bar{U}_i, \quad \delta \bar{u}_i = \bar{u}_i - \bar{u}_{bi}, \quad \Delta \bar{u}_i = \bar{u}_{si} - \bar{U}_i, \quad \eta = (z_s - z)/h \quad (1)$$

$$\bar{k}(\eta) = \Delta \bar{k}(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta \bar{k}(-4\eta^3 + 3\eta^2) + \bar{K}, \quad \delta \bar{k} = \bar{k}_s - \bar{k}_b, \quad \Delta \bar{k} = \bar{k}_s - \bar{K}, \quad \eta = (z_s - z)/h \quad (2)$$

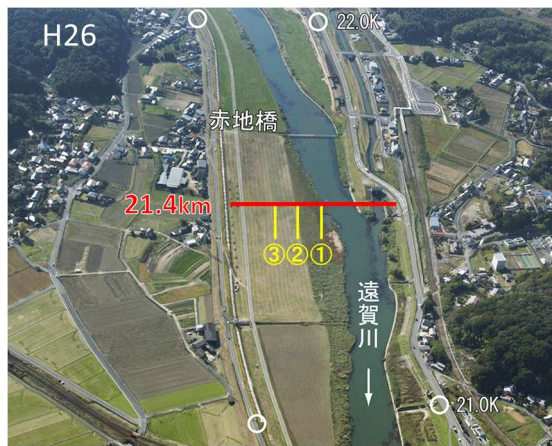


写真-1 赤地地区航空写真

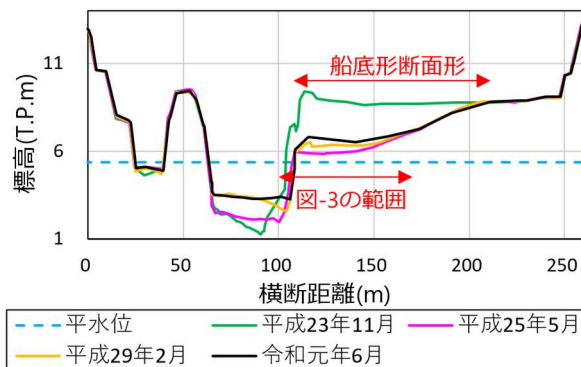


図-2 21.4km地点における改修前後の横断面形と河岸際の土砂堆積

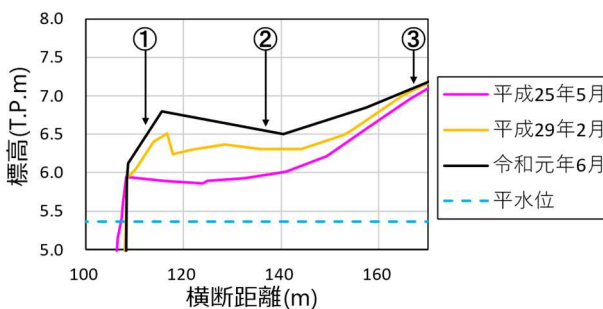


図-3 横断面形の河岸際の拡大図

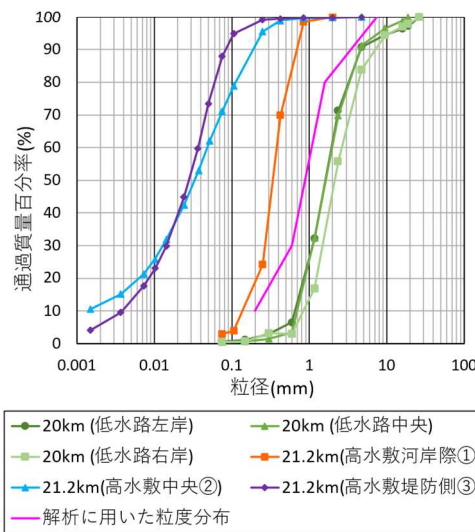


図-4 低水路の河床材料及び高水敷の堆積土砂の粒度分布

ここに、 $i, j=1, 2$, U_i : i 方向の水深平均流速, u_{si}, u_{bi} : i 方向の水面, 底面の流速, K : 水深平均の乱れエネルギー, k_s, k_b : 水面, 底面の乱れエネルギー, z_s : 水位, h : 水深である。

本解析に用いた水深積分した連続式・運動方程式・渦度方程式・底面の乱れエネルギーの輸送方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \overline{dp}}{\partial x_i} - \hat{s} \frac{\tau_{bi}}{\rho} + \frac{\partial h (v_t S_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial h \Omega_i}{\partial t} + \frac{\partial h \Omega_i U_j}{\partial x_j} - \frac{\partial h \Omega_j U_i}{\partial x_j} = D_i + C_{P\omega} v_{tb} \hat{s} \frac{\overline{\omega_{bei}} - \overline{\omega_{bi}}}{h} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h v_t \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

$$D_i = \frac{\partial h \overline{\omega'_j u'_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial h \overline{\omega'_i u'_j}}{\partial x_j} + u_{si} \omega_{s\sigma} - u_{bi} \omega_{b\sigma}$$

ここに、 t : 時間, g : 重力加速度, ρ : 水の密度, dp : 静水圧からの偏差成分, τ_{bi} : 底面せん断応力, $\hat{s} = l / \cos \theta_b$, v_t : 渦動粘性係数, S_{ij} : 水深平均流速のひずみ速度, Ω_i : 水深平均渦度, ω_{bei} : 平衡状態における底面渦度, ω_{bi} : 底面渦度, $C_{P\omega} = \kappa / \alpha$, $\alpha = \kappa / 6$, $\kappa = 0.4$, $\omega_{s\sigma}, \omega_{b\sigma}$: 水面, 底面での鉛直上向きを軸とした渦度, “'”: 水深平均値からの偏差成分である。

$$\frac{\partial k_b}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial k_b}{\partial x_j} = P_{kb} - C_d \frac{k_b^3}{l_d} + \frac{v_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k_b}{\partial x_j^2} + \frac{\hat{s}}{h^2} \frac{v_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k}{\partial \eta^2} \Big|_b \quad (6)$$

ここに、 k_b : 底面の乱れエネルギー, P_{kb} : 底面の乱れの生産項, l_d : 乱れのスケール, $C_d = 0.08$, $\sigma_k = 1.0$ である。

(2) 河床変動解析

図-6は本解析法の河床変動解析の枠組みを示す。本解析では掃流砂の運動を平衡状態と仮定する。遠賀川の河床材料が細砂であることから河床高の時間変化については河床高の連続式より求める。掃流砂の運動については、芦田・道上の平衡流砂量式⁴⁾を用いて評価した。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bj}}{\partial x_j} + (q_{su} - q_{sd}) = 0 \quad (7)$$

ここに、 z_b : 河床高, q_{bj} : j 方向の流砂量, $j=1, 2$, q_{su} : 浮遊砂の巻き上げ量, q_{sd} : 浮遊砂の沈降量である。

浮遊砂の運動については、図-6より、鉛直上向きの浮遊砂フラックス q_{su} を各高さの濃度 $c(\eta)$ と粒子速度 w_p の積で表し、 w_p は流速の乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式(式(8))を各高さで解析した⁵⁾。

$$(\rho_s + C_M \rho) A_3 d^3 \frac{d \hat{w}_p}{dt} = A_3 d^3 (\rho_s - \rho) g \cos \theta_b$$

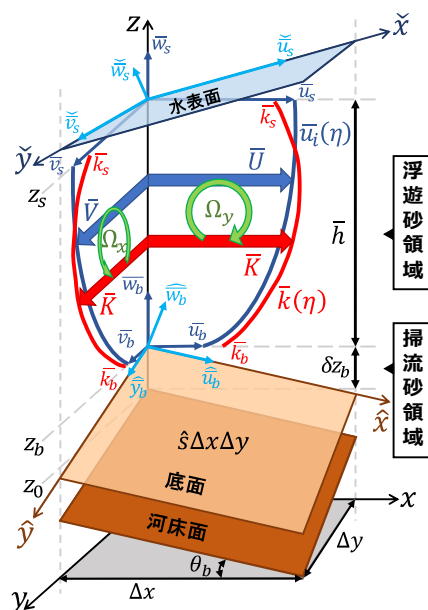


図-5 流速と乱れエネルギーの鉛直分布

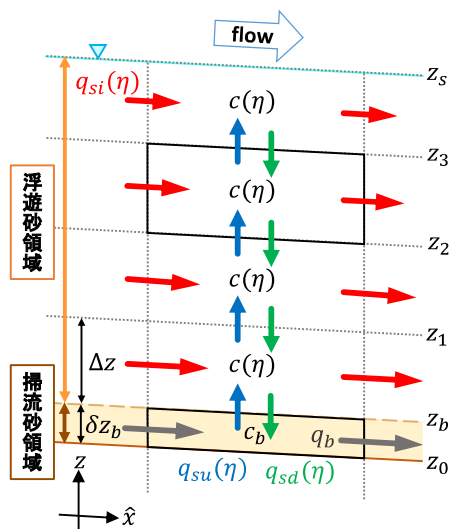


図-6 河床変動解析の枠組み

$$+ \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d^2 |\hat{w} + \hat{w}' - \hat{w}_p| (\hat{u} + \hat{u}' - \hat{u}_p) \quad (8)$$

ここに、 ρ_s : 砂粒子の密度, d : 粒径, A_2 : 2次元の形状係数($A_2 = \pi/4$), A_3 : 3次元の形状係数($A_3 = \pi/6$), \mathbf{u}_p : 砂粒子の速度ベクトル, \mathbf{u} : 粒子周辺の流速ベクトル, C_D : 抗力係数($C_D = 0.4$), C_M : 付加質量係数($C_M = 0.5$)である。“-”はレイノルズ平均値を表している。“'”は底面に沿った座標系を表し、 \hat{w}_{pk} は底面に対し垂直な方向の粒子速度である。流速の乱れ成分 u'_i は、正規分布($N(\sigma, \mu)$, $\sigma^2 = \overline{u'_i u'_i}$, $\mu = \overline{u_i}$)に従うと仮定した。そして、式(8)を1秒間計算し、これを5回繰り返して平均値の鉛直粒子速度 \hat{w}_p を求めた。ここで $\overline{u'_i u'_i}$ は乱れの等方性を仮定し、 $\overline{u'_i u'_i} = (2/3) \overline{k}(\eta)$ により与えている。

鉛直下向きの浮遊砂フラックス q_{sd} は、各高さの濃度 $c(\eta)$ と沈降速度 w_f の積で表した。水平方向の浮遊砂フラックス q_{si} についても各高さの濃度と粒子速度の積で表

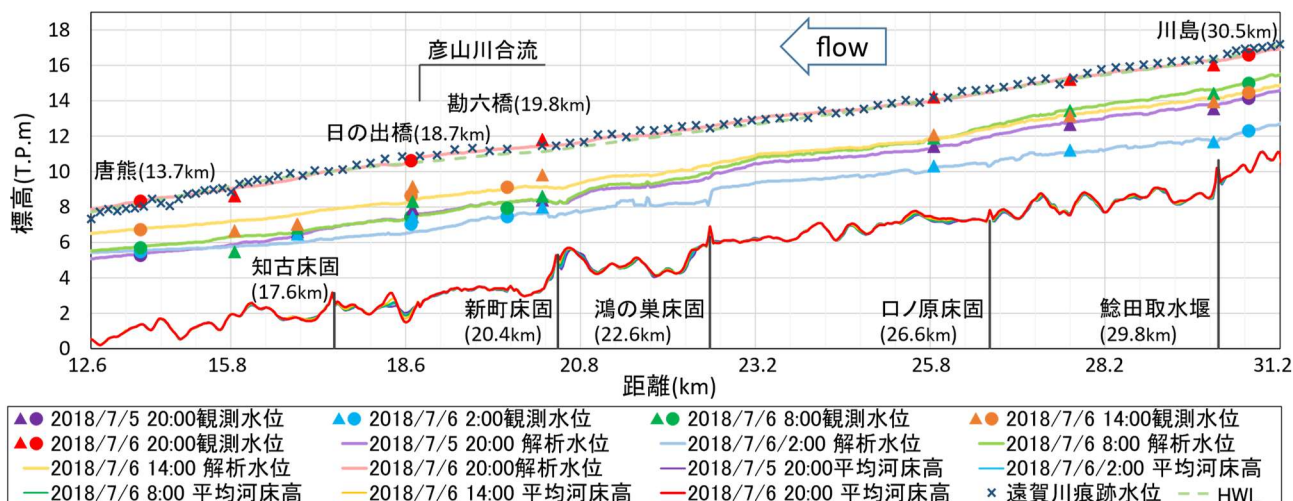


図-7 観測水面形と解析水面形の比較

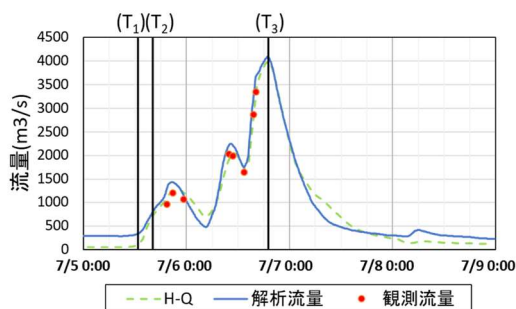


図-8 日の出橋における観測流量と解析流量の比較

し、水平方向の粒子速度は、粒子は速やかに流れに追随するとして、各高さの流速 $u_i(\eta)$ を用いた。これにより、浮遊砂濃度分布を以下の浮遊砂の三次元連続式(式(9))により求めた。

$$\frac{\partial c(\eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_{sj}(\eta)}{\partial x_j} + \frac{\partial q_{su}(\eta) - q_{sd}(\eta)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

底面での境界条件である底面での鉛直上向きの浮遊砂フラックス $q_{su}(\eta_b)$ については、掃流砂濃度 c_b と粒子速度 \hat{w}_p の積で表し、 c_b は芦田・道上式から求まる平衡流砂量 q_b を滑動状態の平衡粒子速度 u_p^a と掃流砂層厚 δz_b で除すことで求めた。掃流砂層厚 δz_b は粒子の跳躍高さとし、関根・吉川らの掃流力と跳躍高さの関係式⁹⁾により評価した。

(3) 解析条件

本解析では、検討対象区間である赤地地区(遠賀川の20.4km~22.6km)について詳しく分析を行うため、細かいメッシュ(4×4m)を用いた詳細計算と、遠賀川全体の流れと河床変動を解析するための広域計算の二段階の解析を行った。

広域計算の解析区間は、遠賀川の唐熊(13.5km)から川島(30.5km)と彦山川の赤池(7.2km)とし(図-1)、解析区間全体の観測水面形と解析水面形が合致するように洪水流・河床変動解析を行い、広域の流れ場と河床変動、流量ハイドログラフの計算をした。上下流端の境界条件は、平成30年7月洪水の唐熊・川島・赤池各地点における観

測水位ハイドログラフを与えた。計算格子の解像度は、流れ方向25m×横断方向8mである。詳細計算の解析区間は遠賀川の20.4km~22.6kmまでとした。上下流端境界条件は、広域計算により求めた水量を与えた。計算格子の解像度は流れ方向4m×横断方向4mである。また、解析に用いた河床材料の粒度分布は図-4に示す。

4. 解析結果とその考察

(1) 広域計算

図-7は洪水増水期からピーク時までの観測水面形と解析水面形の比較と痕跡水位の縦断分布を示す。ここで、プロット(●は水位流量観測所、▲は排水機場)は観測値、実線は解析値を示している。図-8は基準点である日の出橋観測所における観測流量と解析流量の比較を示す。図より、解析結果は観測水面形および観測流量をほぼ再現していることが分かる。

(2) 詳細計算

図-9は主流速コンター(水深平均値)と底面流速ベクトルの時間変化を示す。なお、実線のコンターは地盤高を示す。また、 T_1 は船底形河道区間が低水路満杯の時、 T_2 は複断面河道区間が低水路満杯の時であり、船底形河道区間の高水敷は冠水している状態の時、 T_3 は洪水ピーク時の図をそれぞれ示し、図-8にはこれらの時間帯を示している。 T_2 の時間帯(図-9(b))では、複断面河道区間では低水路のみに水が流れているが、船底形河道区間は21.6km付近より水面幅が広がり、船底形河道区間の高水敷上で1m/s程度の流速が生じている。 T_3 の時間帯(図-9(c))では、河岸付近の高水敷の流速が速くなっており、主流が高水敷に乗り上げていることが分かる。図-10は底面の乱れエネルギーのコンターの時間変化を示す。 T_2 の時間帯(図-10(a))では低水路のみで底面の乱れエネルギーが大きい、 T_3 の時間帯(図-10(b))では底面の乱れ

エネルギーは流速の速い低水路だけではなく、主流が乗り上げる河岸付近の斜面においても高くなっている。

図-11は21.4kmにおける鉛直方向流速コンターおよび二次流分布の時間変化を示しており、洪水のピークに近づくにつれて反時計回りの二次流が発達している。特に洪水ピーク時(図-11(b))は河岸付近での鉛直方向流速が大きくなり、主流が高水敷に乗り上げていることが分かる。また、洪水ピーク時の解析河床形状と初期河床を比較すると、低水路と高水敷の境界付近に土砂堆積が生じていることが分かる。

図-12は底面の浮遊砂濃度コンターの時間変化を示す。船底形河道区間の高水敷が冠水しているT₂の時間帯(図-12(a))を見ると、21.6km付近で複断面河道から船底形河道に遷移するため、水面幅が広がり、流れが高水敷に乗り上げている。この付近で低水路の浮遊砂が21.4kmの河岸際に輸送され、この付近の浮遊砂濃度が高くなっている。T₃の時間帯(図-12(b))については、複断面蛇行区間の浮遊砂濃度は図-12(a)と同様に低水路で高くっており、浮遊砂が低水路を中心に流れていることがわかる。しかし、21.6km付近より下流側では船底形河道区間の高水敷の浮遊砂濃度が高くなっており、前述のように主流が乗り上げることで浮遊砂が高水敷へと輸送されていることが分かる。これらのことから、細粒土砂は高水敷へと乗り上げる主流の流れに乗って高水敷へと輸送され、そこに二次流による流れも加わることで、土砂が輸送されているものと考えられる。

図-13は河床変動コンターの解析結果の時間変化を示す。T₂の時間帯(図-13(a))では、船底形河道区間の高水敷において、図-12(a)に示した浮遊砂濃度が高くなっていた範囲にわずかに土砂が堆積しているが、それ以外の高水敷には土砂堆積がほとんど生じていない。T₃の時間帯(図-13(b))になると船底形河道区間の高水敷の土砂堆積量が増加し、主流が乗り上げる21.6km付近は特に多くの土砂が堆積した。また、堆積範囲もより下流側や堤防側に拡大した。

図-14は洪水前後の河床変動コンターを示しており、上の図が実測値を示し、下の図が解析結果を示す。解析結果は、船底形河道区間において低水路と高水敷の境界付近に土砂堆積が見られ、特に主流が乗り上げる21.6km付近により多く堆積していることなど、実際の傾向を捉えることができている。実測と解析結果の洪水後の横断面形を比較すると(図-15)、解析結果は高水敷の河岸際に土砂が堆積する傾向を説明できているが、実測よりも堆積量がやや大きめに算定されている。

以上より、複断面河道から船底形河道の改修において主流が乗り上げ易い内岸側の高水敷を切り下げ船底形断面に改修しているが、高水敷に主流が乗り上げ易くなり高水敷河岸への浮遊砂の輸送が大きくなっていることが分かった。このことから、船底形河道への改修の際には高水敷の高さだけでなく、低水路の線形や複断面河道と

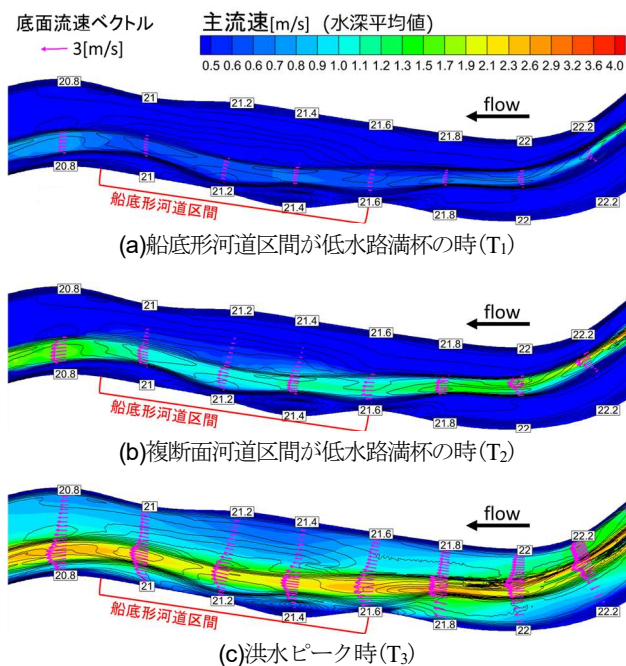


図-9 主流速コンター図の時間変化

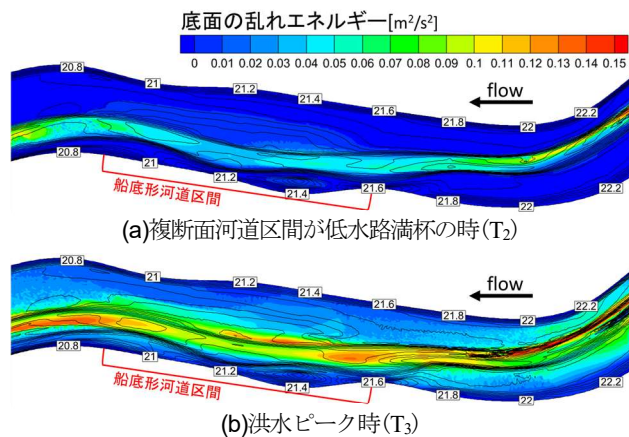


図-10 底面の乱れエネルギーのコンター図の時間変化

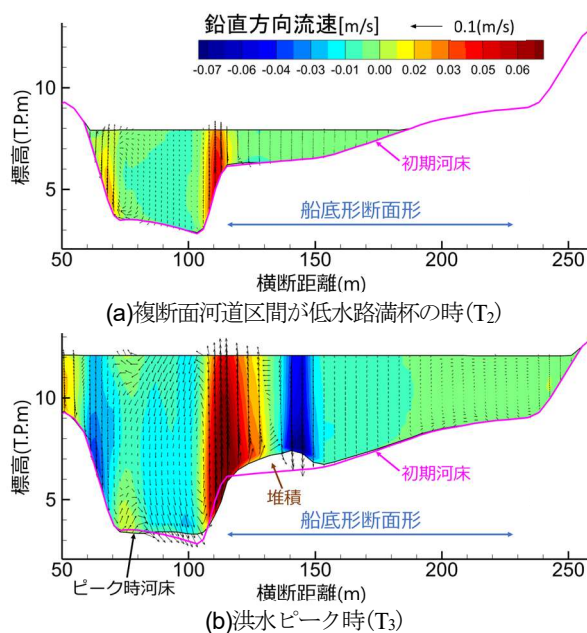


図-11 21.4km横断における二次流の解析結果の時間変化

船底形河道の接続部の縦横断形について検討し、浮遊砂堆積の小さい河道にする必要がある。

5. まとめ

本研究では、船底形河道に改修され、その後、高水敷と低水路の境界付近に顕著な土砂堆積が見られた赤地地区を対象とし、新たに構築した解析法により三次元流れと乱れエネルギーの分布を計算し、河岸斜面付近の細粒土砂の巻き上げ量と輸送・堆積の機構を明らかにした。

赤地地区の船底形河道は緩やかな河道蛇行の内岸側に位置しており、洪水ピーク付近では主流が高水敷に乗り上げ、これに伴い河岸際に鉛直方向流速や乱れエネルギーが大きくなっていった。このため、低水路から河岸付近に細粒土砂が輸送され、低水路と高水敷の境界部分に顕著な土砂堆積が生じた。

この機構を解明することにより以下の点が明らかになった。高水敷の河岸際に細粒土砂の堆積が生じにくい、管理のしやすい船底形河道の設計を行うためには、河道断面形だけでなく、河道の蛇行も踏まえて低水路線形の変更と一体的に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり方—治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて—、土木学会論文集F, Vol.66, No.4, pp.471-489, 2010.
- 2) 笹木拓真, 宮原幸嗣, 福岡捷二：複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化, 河川技術論文集, 第20巻, pp.277-282, 2014.
- 3) 内田龍彦, 福岡捷二：浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 水工学論文集, 第56巻, I_1225-I_1230, 2012.
- 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) Takahisa Gotoh, Shoji Fukuoka : 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, 22nd IAHR-APD Congress, 2020.
- 6) 関根正人, 吉川秀夫：掃流砂の流送機構に関する研究, 土木学会論文集, 第351号, pp.69-75, 1984.

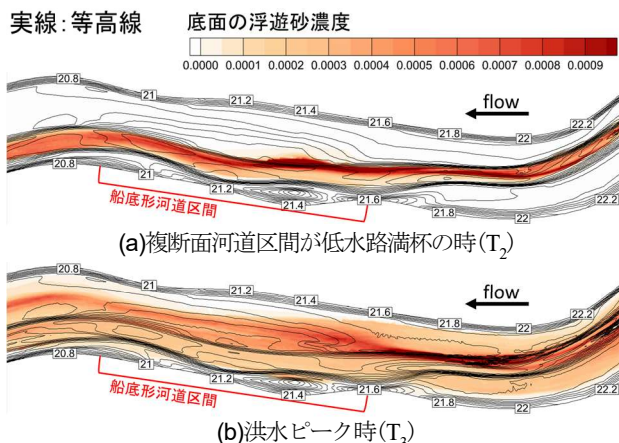


図-12 底面の浮遊砂濃度コンター図の時間変化

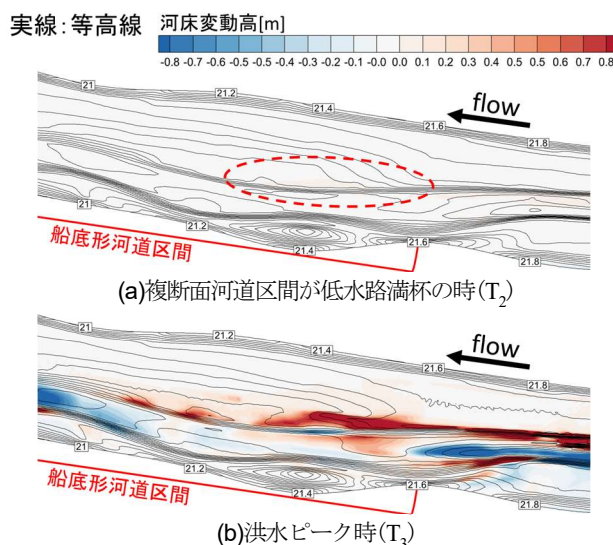


図-13 解析河床変動コンター図の時間変化

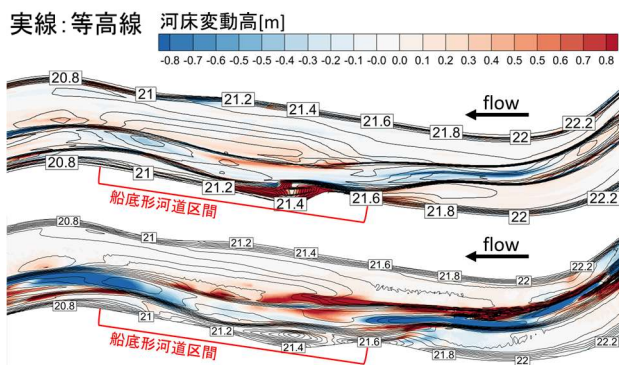


図-14 洪水後の実測河床変動コンター図 (上:実測, 下:解析)

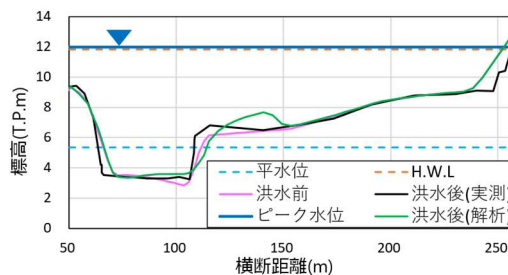


図-15 21.4km地点における実測と解析の横断面形の比較

(2021. 4. 2受付)